

UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



## **Pegada Carbónica e Área Ocupada para Produção de Eletricidade em Portugal Continental**

Alexander Coutinho Marques

**Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente**

Dissertação orientada por:  
Prof. Dr. Carla Alexandra Monteiro da Silva  
Prof. Dr. Cristina Maria Sousa Catita

## Agradecimentos

Esta dissertação é dedicada aos meus pais pelo amor e liberdade que me deram ao longo da vida, encorajando-me a explorar e estudar o que me interessasse, mas sempre com o pensamento de melhorar a cada passo dado. Fico feliz por ter acabado esta etapa onde acabei e espero um dia poder retribuir o que me deram.

Gostava de dar um agradecimento especial às professoras Carla Silva e Cristina Catita. Esta foi uma dissertação longa e trabalhosa e parte dos louvores que esta receba terão sempre de ser passados a elas. Sem a ajuda, encorajamento e orientação que ambas me deram dificilmente seria possível atingir o nível de trabalho e rigor demonstrados nesta dissertação.

Por fim, um obrigado aos muitos amigos e colegas que fiz durante este percurso na universidade. Tendo passado por momentos mais e menos felizes, tenho a certeza que fiz aqui amizades para o resto da vida. Tenho entranhado dentro de mim muitas das vossas maneiras de ser, de falar e de fazer, e levo muito boas recordações destes anos ao vosso lado. Nunca esquecerei os longos dias que passámos a estudar na biblioteca do C8.

*If you know, you know...*

## Resumo

Esta dissertação constitui um estudo de dois indicadores de sustentabilidade associados à geração de energia elétrica em Portugal: a intensidade carbónica e a área ocupada para diversas fontes de produção de eletricidade do *mix* de geração de energia elétrica de Portugal continental entre os anos de 2015 e 2018. A ordem de grandeza dos valores encontrados foi comparada com as bases de dados de valores *standard* do IPCC, Ecoinvent, SNIAmb, documentos AIA, e estudos teóricos de forma a comprovar a sua validade.

Devido ao facto dos valores tabelados da intensidade carbónica associados à eletricidade produzida por este *mix* representarem apenas as emissões diretas (e muitas vezes somente as de  $\text{CO}_2$ ) associadas à queima de combustíveis fósseis primários na fase de operação, nesta dissertação, a análise deste valor foi expandida de modo a englobar as emissões indiretas e diretas associadas aos diversos materiais utilizados em duas das três fases do ciclo de vida de uma central, as fases de construção e operação, de cada um dos seis tipos de centrais estudadas, e todos os gases com efeito de estufa emitidos, nomeadamente o  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{SF}_6$ . Para isso, foram recolhidos e analisados diversos estudos do ciclo de vida das variadas tecnologias utilizadas para produção de eletricidade em diversos pontos do globo, como por exemplo centrais nos Estados Unidos, Brasil, ou China, e diversos valores de fator de emissão associados quer às emissões indiretas, onde foi excluído o transporte, quer às emissões diretas de cada material utilizado. Com estes valores, foi possível estimar dois fatores de emissão distintos, um deles intitulado de fator de emissão direto, que inclui unicamente as emissões diretas da queima do combustível principal utilizado para produção de eletricidade, e o fator correspondente às emissões totais, que inclui as restantes emissões diretas da fase de operação, como por exemplo o uso do refrigerante  $\text{SF}_6$ , bem como as emissões indiretas da fase de operação, por exemplo as correspondentes à extração do combustível de entrada, e as emissões da fase de construção, intitulado de fator de emissão total. Assim, este estudo consiste na análise a seis tecnologias - as centrais hidroelétricas com albufeira de reserva e a fio de água, centrais termoelétricas a carvão e a gás natural, centrais eólicas, e centrais solar fotovoltaicas – sendo que a fronteira do sistema para a pegada carbónica inclui a extração de materiais e a sua transformação, e a construção e operação de cada central, excluindo o transporte de eletricidade pela rede até ao consumidor final. Os fatores de conversão para  $\text{CO}_{2eq}$  respeitam os valores associados ao potencial de aquecimento global, numa base de 100 anos, descritos no quinto relatório do IPCC.

Tendo em conta que a média dos valores tabelados entre 2015 e 2018 é equivalente a  $307 \text{ g CO}_2/\text{kWh}$ , os resultados obtidos apresentaram valores médios para os dois fatores referidos anteriormente de 397 e  $475 \text{ g CO}_{2eq}/\text{kWh}$ , respetivamente, o que corresponde a 129% e 155% da média dos valores apresentados ao público. Tal como esperado, as centrais termoelétricas a carvão representam a maior fonte de emissão de gases com efeito de estufa por kWh produzido, com um valor 3 vezes superior às segundas classificadas, as centrais termoelétricas a gás natural, e 39 vezes superior às centrais com o fator de emissão específico mais baixo, as centrais solar fotovoltaicas.

Relativamente à área ocupada, cuja fronteira cinge-se à área de construção, foi mapeada a área ocupada pelas centrais ativas no período em estudo e obtiveram-se informações relativas às razões área ocupada por potência instalada, e área ocupada por eletricidade produzida que poderão vir a ser úteis em processos de escolha relacionados com o ordenamento do território. Nesta dissertação foi obtido um mapa com a extensão de Portugal continental no qual se representam as assumidas áreas utilizadas para a produção de energia elétrica, tendo a totalidade destas áreas aumentado de 590 para  $623 \text{ km}^2$ , semelhante à área do município de Pombal, Leiria. Desta área, em média, 89% é ocupada por centrais hidroelétricas, 8% por centrais eólicas, e os restantes 3% divididos pelas restantes tecnologias. A

tecnologia que apresenta valores mais baixos de área ocupada por potência instalada e por eletricidade produzida, representando uma melhor ocupação do espaço utilizado, é a termoelétrica a gás natural, enquanto a tecnologia com valores mais altos é a hidroelétrica com albufeira.

Esta dissertação estima que a intensidade carbónica varia de  $32 \text{ g CO}_{2eq}/kWh$  para uma central solar fotovoltaica a  $1245 \text{ g CO}_{2eq}/kWh$  para uma central termoelétrica a carvão, a razão área ocupada por potência instalada varia de  $0,08 \text{ m}^2/kW$  para uma central termoelétrica a gás natural a  $86 \text{ m}^2/kW$  para uma central hidroelétrica com albufeira, e a razão área ocupada por eletricidade produzida varia de  $2 \times 10^{-5} \text{ m}^2/kWh$  para uma central termoelétrica a gás natural a  $5 \times 10^{-2} \text{ m}^2/kWh$  para uma central hidroelétrica com albufeira.

#### Palavras-chave:

Gases com efeito de estufa; Emissões diretas e indiretas; Fase de construção e de operação; *Mix* de geração de energia elétrica; Ciclo de vida.

## Abstract

This thesis constitutes a study of two sustainability indicators associates with the production of electricity in Portugal: carbon intensity and occupied area for the diverse sources of production in the electric energy generation mix of continental Portugal between the years of 2015 and 2018. The order of magnitude of the calculated values was compared with the standard values present in the databases of IPCC, Ecoinvent, SNIAmb, EIA documents and theoretical studies in order to prove their validity.

Since the tabulates values of the carbonic intensity associated to the electricity produced by this mix only represent the direct emissions (and many times just the ones associated with  $\text{CO}_2$ ) linked to burning the primary fossil fuels used in the operational phase, in this thesis, the analysis of this value was expanded to include the indirect and direct emissions associated with the various materials used in two of the three phases of the lifecycle of a power plant, the construction and operational phases, of each one of the six types of power plants studied, and all the emitted greenhouse gases, namely  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{SF}_6$ . To achieve this, different studies on the life cycle of the various technologies used to produce electricity in different points across the globe, such as the United States, Brazil or China, and various emission factor values associated with both the indirect emissions, where transportation was not included, and direct emissions for each material used were gathered and analyzed. With these values, it was possible to estimate two distinct emission factors, one denominated direct emission factor, that included only the direct emissions associated with burning the main fossil fuel used for the production of electricity, and the factor correspondent to the total emissions, that includes the rest of the direct emissions of the operational phase, such as the usage of the coolant  $\text{SF}_6$ , as well as the indirect emissions in the operational phase, such as the ones corresponding to the extraction of the entry fuel, and the emissions in the construction phase, named total emission factor. Knowing that the average tabulated value between 2015 and 2018 is  $307 \text{ g CO}_{2eq}/kWh$ , the results of this thesis show that the average values of the two factors mentioned previously are 397 e  $475 \text{ g CO}_{2eq}/kWh$ , respectively, which corresponds to 129% and 155% of the average value presented to the public. As expected, coal powered thermoelectric power plants represent the biggest source for greenhouse gas emissions per kWh produced, with a value 3 times larger than second-placed natural gas-powered thermoelectric power plants, and 39 times larger than solar photovoltaic power plants, the ones with the lowest specific emission factor. So, this study consists of an analysis of six technologies – hydroelectric with reservoir and run-of-river, thermoelectric powered by coal and natural gas, wind, and solar photovoltaic – where

the system's limits for the carbon footprint include the extraction of materials and their transformation, and the construction and operation of each power plant, excluding the transport of electricity via the grid to the final consumer. The conversion factors for  $CO_{2eq}$  respect the values associated with the global warming potential, on a 100-years base, detailed on the IPCC's fifth report.

In terms of occupied area, whose limits are constrained to the construction area, the area occupied by the active power plants during the study period was mapped and information related to the ratios of area occupied per installed power and area occupied per electricity produced, which might be useful in the choosing process related to land management, was obtained. So, in this thesis, a map with the same geographical extension as the Portuguese mainland was produced to represent the assumed areas used to produce electric energy was created, with the total area growing from 590 to 623 km<sup>2</sup>, which is similar to the area of the municipality of Pombal, Leiria. From this area, on average, 89% is occupied by hydroelectric power plant with a reservoir, 8% by wind power plants, and the remaining 3% split between the other technologies. The technology that has the lowest values of occupied area per installed power and per electricity produced, representing a better used of the space it occupies, is natural gas powered thermoelectric, while the technology with the highest values is hydroelectric with reservoir.

This thesis estimates that the carbon intensity varies from 32  $g\ CO_{2eq}/kWh$  for a solar photovoltaic power plant to 1245  $g\ CO_{2eq}/kWh$  for a coal powered thermoelectric power plant, the ratio of area occupied per installed power varies from 0.08  $m^2/kW$  for a natural gas powered thermoelectric power plant to 86  $m^2/kW$  for a hydroelectric power plant with reservoir, and the ratio of area occupied per electricity produced varies from  $2 \times 10^{-5}\ m^2/kWh$  for a natural gas thermoelectric power plant to  $5 \times 10^{-2}\ m^2/kWh$  for a hydroelectric power plant with reservoir.

#### Keywords:

Greenhouse gases; Direct and indirect emissions; Construction and operational phase; Electric energy generation mix; Lifecycle.

## Índice de figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 3.1: Mapa das centrais existentes em Portugal continental entre os anos de 2015 e 2018. (Dados provenientes do projeto e2p <sup>[R.5]</sup> ).....   | 13 |
| Figura 4.1: Mapa das centrais hidroelétricas com albufeira de reserva estudadas em Portugal continental entre os anos de 2015 e 2018, inclusive. (Dados provenientes do projeto e2p <sup>[R.5]</sup> ).....   | 18 |
| Figura 4.2: Divisão das diversas fontes de emissão na fase de construção de uma central hidroelétrica com albufeira de reserva.....   | 20 |
| Figura 4.3: Divisão das diversas fontes de emissão na fase de operação de uma central hidroelétrica com albufeira de reserva. ....  | 21 |
| Figura 4.4: Gráfico da variação anual das emissões de gases com efeito de estufa nas fases de construção e operação, e, por sua vez, das emissões totais, referentes às centrais hidroelétricas com albufeira de reserva em funcionamento em Portugal continental entre 2015 e 2018, inclusive, e a média destes valores. No gráfico também encontra-se representado o erro presente nos cálculos referentes a estas centrais, efetuados nesta dissertação..... | 22 |
| Figura 4.5: Exemplo de área de uma central hidroelétrica com albufeira de reserva mapeada. Neste exemplo é observável a área da central de Vale do Gaio e da albufeira adjacente, a albufeira de Vale do Gaio. ....   | 24 |
| Figura 4.6: Gráfico da evolução anual da razão de área ocupada por potência instalada para centrais hidroelétricas com albufeira de reserva estudadas entre 2015 e 2018, inclusive. ....  | 26 |
| Figura 4.7: Gráfico da evolução anual da razão de área ocupada por eletricidade produzida para centrais hidroelétricas com albufeira de reserva estudadas entre 2015 e 2018, inclusive. ....  | 26 |
| Figura 5.1: Mapa das centrais hidroelétricas a fio de água estudadas em Portugal continental entre os anos de 2015 e 2018, inclusive. (Dados provenientes do projeto e2p <sup>[R.5]</sup> ). ....   | 28 |
| Figura 5.2: Divisão das diversas fontes de emissão na fase de construção de uma central hidroelétrica a fio de água. ....   | 30 |
| Figura 5.3: Divisão das diversas fontes de emissão na fase de operação de uma central hidroelétrica a fio de água. ....   | 32 |
| Figura 5.4: Gráfico da variação anual das emissões de gases com efeito de estufa nas fases de construção e operação, e, por sua vez, das emissões totais, referentes às centrais hidroelétricas a fio de água em funcionamento em Portugal continental entre 2015 e 2018, inclusive, e a média destes valores. No gráfico também encontra-se representado o erro presente nos cálculos referentes a estas centrais, efetuados nesta dissertação.....            | 32 |
| Figura 5.5: Exemplo de área de uma central hidroelétrica a fio de água mapeada. Neste exemplo é observável a área correspondente ao açude, canal hidráulico à superfície e a central do Palhal. ....  | 34 |
| Figura 5.6: Gráfico da evolução anual da razão de área ocupada por potência instalada para centrais hidroelétricas a fio de água estudadas entre 2015 e 2018, inclusive. ....   | 35 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 5.7: Gráfico da evolução anual da razão de área ocupada por eletricidade produzida para centrais hidroelétricas a fio de água estudadas entre 2015 e 2018, inclusive. ....  | 36 |
| Figura 6.1: Mapa das centrais termoelétricas a carvão estudadas em Portugal continental entre os anos de 2015 e 2018, inclusive. (Dados provenientes do projeto e2p <sup>[R.5]</sup> ). ....   | 37 |
| Figura 6.2: Divisão das diversas fontes de emissão na fase de construção de uma central termoelétrica a carvão. ....   | 40 |
| Figura 6.3: Divisão das diversas fontes de emissão na fase de operação de uma central termoelétrica a carvão. ....   | 42 |
| Figura 6.4: Gráfico da variação anual das emissões de gases com efeito de estufa nas fases de construção e operação, e, por sua vez, das emissões totais, referentes às centrais termoelétricas a carvão em funcionamento em Portugal continental entre 2015 e 2018, inclusive, e a média destes valores. No gráfico também encontra-se representado o erro presente nos cálculos referentes a estas centrais, efetuados nesta dissertação.....      | 43 |
| Figura 6.5: Exemplo de área de uma central termoelétrica a carvão mapeada. Neste exemplo é observável a área correspondente à central de Sines e os canais de adução de água associados a ela..  | 44 |
| Figura 6.6: Gráfico da evolução anual da razão de área ocupada/potência instalada para centrais termoelétricas a carvão estudadas entre 2015 e 2018, inclusive. ....   | 46 |
| Figura 6.7: Gráfico da evolução anual da razão de área ocupada/eletricidade produzida para centrais termoelétricas a carvão estudadas entre 2015 e 2018, inclusive. ....   | 46 |
| Figura 7.1: Mapa das centrais termoelétricas a gás natural estudadas em Portugal continental entre os anos de 2015 e 2018, inclusive. (Dados provenientes do projeto e2p <sup>[R.5]</sup> ). ....  | 48 |
| Figura 7.2: Divisão das diversas fontes de emissão na fase de construção de uma central termoelétrica a gás natural. ....  | 50 |
| Figura 7.3: Divisão das diversas fontes de emissão na fase de operação de uma central termoelétrica a gás natural. ....  | 52 |
| Figura 7.4: Gráfico da variação anual das emissões de gases com efeito de estufa nas fases de construção e operação, e, por sua vez, das emissões totais, referentes às centrais termoelétricas a gás natural em funcionamento em Portugal continental entre 2015 e 2018, inclusive, e a média destes valores. No gráfico também encontra-se representado o erro presente nos cálculos referentes a estas centrais, efetuados nesta dissertação..... | 53 |
| Figura 7.5: Exemplo de área de uma central termoelétrica a gás natural mapeada. Neste exemplo é observável a área correspondente à central de Lares.....   | 54 |
| Figura 7.6: Gráfico da evolução anual da razão de área ocupada por potência instalada para centrais termoelétricas a gás natural estudadas entre 2015 e 2018, inclusive.....   | 56 |
| Figura 7.7: Gráfico da evolução anual da razão de área ocupada por eletricidade produzida para centrais termoelétricas a gás natural estudadas entre 2015 e 2018, inclusive.....   | 56 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 8.1: Mapa das centrais eólicas estudadas em Portugal continental entre os anos de 2015 e 2018, inclusive. (Dados provenientes do projeto e2p <sup>[R.5]</sup> ). .....  | 58 |
| Figura 8.2: Divisão das diversas fontes de emissão na fase de construção de uma central eólica. ....   | 61 |
| Figura 8.3: Divisão das diversas fontes de emissão na fase de operação de uma central eólica. ....   | 62 |
| Figura 8.4: Gráfico da variação anual das emissões de gases com efeito de estufa nas fases de construção e operação, e, por sua vez, das emissões totais, referentes às centrais eólicas em funcionamento em Portugal continental entre 2015 e 2018, inclusive, e a média destes valores. No gráfico também encontra-se representado o erro presente nos cálculos referentes a estas centrais, efetuados nesta dissertação. .  | 63 |
| Figura 8.5: Exemplo de área de uma central eólica mapeada. Neste exemplo é observável a área correspondente às turbinas eólicas da central de Barão de São João e as estradas de acesso a essas turbinas. ....   | 64 |
| Figura 8.6: Gráfico da evolução anual da razão de área ocupada por potência instalada para centrais eólicas estudadas entre 2015 e 2018, inclusive. ....   | 66 |
| Figura 8.7: Gráfico da evolução anual da razão de área ocupada por eletricidade produzida para centrais eólicas estudadas entre 2015 e 2018, inclusive. ....   | 66 |
| Figura 9.1: Mapa das centrais solar fotovoltaicas estudadas em Portugal continental entre os anos de 2015 e 2018, inclusive. (Dados provenientes do projeto e2p <sup>[R.5]</sup> ). ....   | 67 |
| Figura 9.2: Divisão das diversas fontes de emissão na fase de construção de uma central solar fotovoltaica. ....   | 70 |
| Figura 9.3: Divisão das diversas fontes de emissão na fase de operação de uma central solar fotovoltaica. ....   | 72 |
| Figura 9.4: Gráfico da variação anual das emissões de gases com efeito de estufa nas fases de construção e operação, e, por sua vez, das emissões totais, referentes às centrais solar fotovoltaicas em funcionamento em Portugal continental entre 2015 e 2018, inclusive, e a média. ....  | 73 |
| Figura 9.5: Exemplo de área de uma central solar fotovoltaica mapeada. Neste exemplo é observável a área correspondente à central de Amareleja e as estradas de acesso a esta. ....  | 74 |
| Figura 9.6: Gráfico da evolução anual da razão de área ocupada por potência instalada para centrais solar fotovoltaicas estudadas entre 2015 e 2018, inclusive. ....   | 76 |
| Figura 9.7: Gráfico da evolução anual da razão de área ocupada por eletricidade produzida para centrais solar fotovoltaicas estudadas entre 2015 e 2018, inclusive. ....   | 76 |
| Figura 10.1: Gráfico da variação anual das emissões totais de gases com efeito de estufa associadas à produção de eletricidade a partir das centrais em funcionamento em Portugal continental entre 2015 e 2018, inclusive, e a sua média. No gráfico está, também, representada a subdivisão destas emissões pelas fases de construção e operação, e o erro presente nos valores obtidos para as emissões de gases com efeito de estufa na fase de construção. .... | 77 |



|   |    |
|---|----|
| Figura 10.2: Gráfico de subdivisão das emissões totais médias de gases com efeito de estufa associadas à produção de eletricidade pelos diversos tipos de centrais em funcionamento em Portugal continental. ....   | 78 |
| Figura 10.3: Gráfico de comparação das emissões totais médias de gases com efeito de estufa associadas à fase de construção dos diversos tipos de centrais em funcionamento em Portugal continental. ....   | 78 |
| Figura 10.4: Gráfico de comparação das emissões totais médias de gases com efeito de estufa associadas à fase de operação dos diversos tipos de centrais em funcionamento em Portugal continental. ....   | 79 |
| Figura 10.5: Gráfico de comparação entre o fator de emissão direta médio associados a cada um dos tipos de centrais estudados nesta dissertação. ....   | 80 |
| Figura 10.6: Gráfico de comparação entre o fator de emissão total médio associados a cada um dos tipos de centrais estudados nesta dissertação. ....  | 81 |
| Figura 10.7: Listagem dos valores de fator de emissão total associados a diversas tecnologias de produção de eletricidade quando contabilizadas as fases de construção e operação. Valores estes apresentados nos inventários do IPCC e Ecoinvent. ....                                     | 82 |
| Figura 10.8: Gráfico da evolução do fator de emissão tabelado, direto calculado, e total calculado associado ao mix de geração de energia elétrica de Portugal continental ao longo do período de estudo desta dissertação, 2015 a 2018, inclusive, e os valores médios desses 4 anos. .... | 83 |
| Figura 10.9: Mapa da área ocupada pelas centrais produtoras de eletricidade estudadas em 2018, correspondente à área total contabilizada nesta dissertação. ....  | 84 |
| Figura 10.10: Gráfico da evolução da área ocupada para produção de eletricidade em Portugal continental entre 2015 e 2018, inclusive, e a subdivisão desta pelas diversas tecnologias estudadas nesta dissertação. ....   | 85 |
| Figura 10.11: Divisão da área total média ocupada pelas diversas tecnologias em estudo nesta dissertação. ....  | 86 |
| Figura 10.12: Gráfico de comparação entre o valor médio da razão área ocupada/potência instalada associado a cada um dos tipos de centrais estudados nesta dissertação. ....  | 87 |
| Figura 10.13: Gráfico de comparação entre o valor médio da razão área ocupada/eletricidade produzida associado a cada um dos tipos de centrais estudados nesta dissertação. ....  | 88 |

## Índice de tabelas

|  |    |
|--|----|
| Tabela 3.1: Evolução do número de centrais estudadas, potência instalada, e energia elétrica produzida em Portugal continental ao longo do período de tempo em estudo.....   | 14 |
| Tabela 3.2: Valores anuais de energia elétrica produzida por centrais termoelétricas a carvão e gás natural em Portugal continental entre 2015 e 2018, inclusive, obtidos a partir do centro de informação da REN <sup>[R.6]</sup> .....   | 14 |
| Tabela 3.3: Valores anuais de energia elétrica produzida por centrais hidroelétricas a fio de água e com albufeira de reserva, eólicas, e solar fotovoltaicas em Portugal continental entre 2015 e 2018, inclusive, obtidos a partir do centro de informação da REN <sup>[R.6]</sup> .....   | 15 |
| Tabela 3.4: Síntese dos valores anuais de energia elétrica produzida em Portugal continental entre 2015 e 2018, inclusive, obtidos a partir do centro de informação da REN <sup>[R.6]</sup> , subdivididos por tipo de tecnologia utilizado e as respetivas percentagens dessa subdivisão.....   | 16 |
| Tabela 4.1: Evolução do número de centrais, potência instalada e energia elétrica produzida no conjunto de centrais hidroelétricas com albufeira de reserva estudadas em Portugal continental entre 2015 e 2018, inclusive, bem como as percentagens da energia elétrica total produzida com fonte conhecida e com fonte assumida..... | 18 |
| Tabela 4.2: Listagem de emissões relacionadas com a construção de uma central na China com potência nominal de 44 MW e tempo de vida de 50 anos tal como descrito no projeto A do estudo da Hydratek <sup>[R.24]</sup> .....   | 19 |
| Tabela 4.3: Listagem de emissões relacionadas com a construção de uma central na China com potência nominal de 3600 MW e tempo de vida de 100 anos tal como descrito no projeto B do estudo da Hydratek <sup>[R.24]</sup> .....  | 19 |
| Tabela 4.4: Listagem de material utilizado para construção de uma central hidroelétrica com albufeira de reserva na Suíça com potência nominal de 95 MW e tempo de vida de 150 anos, tal como descrito no estudo sobre inventários do ciclo de vida de centrais hidroelétricas encomendado pelo Öko-Institute <sup>[R.25]</sup> .....  | 19 |
| Tabela 4.5: Lista de fatores de conversão utilizados, calculados a partir dos consumos analisados para as centrais hidroelétricas com albufeira presentes nas declarações ambientais da EDP <sup>[R.7], [R.8], [R.9], [R.10], [R.11], [R.12]</sup> .....   | 21 |
| Tabela 4.6: Fator de emissão total médio calculado anualmente para centrais hidroelétricas com albufeira de reserva e a sua média de valores para o intervalo de tempo estudado.....   | 23 |
| Tabela 4.7: Evolução da área ocupada para produção de energia elétrica através de centrais hidroelétricas com albufeira durante o período de estudo, 2015 a 2018, inclusive, e a sua ocupação percentual da área de Portugal continental <sup>[R.27]</sup> .....   | 24 |

|  |    |
|--|----|
| Tabela 4.8: Evolução do erro associado à área ocupada para produção de eletricidade através de centrais hidroelétricas com albufeira entre 2015 e 2018, inclusive, e o seu valor médio. ....   | 25 |
| Tabela 5.1: Evolução do número de centrais, potência instalada e energia elétrica produzida no conjunto de centrais hidroelétricas a fio de água estudadas em Portugal continental entre 2015 e 2018, inclusive, bem como as percentagens da energia elétrica total produzida com fonte conhecida e com fonte assumida. ....                                       | 28 |
| Tabela 5.2: Listagem de material utilizado para construção de uma central hidroelétrica a fio de água na Suíça com potência nominal de 8,6 MW e tempo de vida de 80 anos tal como descrito no estudo sobre inventários do ciclo de vida de centrais hidroelétricas encomendado pelo Öko-Institute <sup>[R.25]</sup> . ....   | 29 |
| Tabela 5.3: Listagem de material utilizado para construção de uma central com potência nominal de 18,4 MW e tempo de vida de 50 anos tal como descrito no inventário do estudo sobre o ciclo de vida de centrais hidroelétricas a fio de água no Peru <sup>[R.28]</sup> . ....   | 29 |
| Tabela 5.4: Listagem de emissões associadas à construção da central hidroelétrica a fio de água Rayat, com potência nominal de 3 MW e tempo de vida de 30 anos, tal como descrito no inventário do estudo sobre o ciclo de vida deste tipo de centrais na Índia <sup>[R.29]</sup> . ....   | 29 |
| Tabela 5.5: Listagem dos consumos contabilizados nesta dissertação, presentes na fase de operação de uma central hidroelétrica a fio de água na Suíça com potência nominal de 8,6 MW e tempo de vida de 80 anos, tal como descrito no estudo sobre inventários do ciclo de vida de centrais hidroelétricas encomendado pelo Öko-Institute <sup>[R.25]</sup> . .... | 31 |
| Tabela 5.6: Fator de emissão total médio calculado anualmente para centrais hidroelétricas a fio de água e a sua média de valores. ....  | 33 |
| Tabela 5.7: Evolução da área ocupada para produção de energia elétrica através de centrais hidroelétricas a fio de água durante o período de estudo, 2015 a 2018, inclusive, e a sua ocupação percentual da área de Portugal continental <sup>[R.27]</sup> . ....  | 34 |
| Tabela 5.8: Comparação da área total obtida e área teoricamente necessária, e erro associado ao longo dos anos em estudo. ....   | 35 |
| Tabela 6.1: Evolução do número de centrais, potência instalada e energia elétrica produzida no conjunto de centrais termoeletricas a carvão estudadas em Portugal continental entre 2015 e 2018, inclusive, bem como as percentagens da energia elétrica total produzida com fonte conhecida e com fonte assumida. ....  | 37 |
| Tabela 6.2: Listagem de material utilizado para construção de uma central com potência nominal de 460 MW e tempo de vida de 30 anos tal como descrito no inventário do estudo relativo ao ciclo de vida de centrais termoeletricas a carvão nos Países Baixos <sup>[R.30]</sup> . ....   | 38 |
| Tabela 6.3: Listagem de material utilizado na construção de uma central termoeletrica a carvão com potência nominal de 500 MW e tempo de vida de 30 anos tal como descrito no relatório da Ecoinvent sobre o ciclo de vida do sistema energético de diversos países da UCTE <sup>[R.19]</sup> . ....   | 38 |

|  |    |
|--|----|
| Tabela 6.4: Listagem de material utilizado na construção de uma central com potência nominal de 360 MW e tempo de vida de 30 anos tal como descrito no relatório da NREL sobre o ciclo de vida de centrais termoeletricas a carvão nos EUA <sup>[R.17]</sup> .....   | 39 |
| Tabela 6.5: Listagem de material utilizado na construção de uma central com potência nominal de 843,6 MW e tempo de vida de 30 anos tal como descrito num estudo referente ao ciclo de vida de centrais termoeletricas a carvão na China <sup>[R.31]</sup> .....   | 39 |
| Tabela 6.6: Lista de fatores de conversão utilizados, calculados a partir dos consumos analisados para as centrais termoeletricas a carvão presentes nas declarações ambientais da EDP <sup>[R.13], [R.14]</sup> .....   | 41 |
| Tabela 6.7: Fatores de emissão direta e total médio calculado anualmente para centrais termoeletricas a carvão e a média dos seus valores. ....  | 44 |
| Tabela 6.8: Evolução da área ocupada para produção de energia elétrica através de centrais termoeletricas a carvão durante o período de estudo, 2015 a 2018, inclusive, e a sua ocupação percentual da área de Portugal continental <sup>[R.27]</sup> .....  | 45 |
| Tabela 6.9: Comparação da área total obtida e área real ocupada pelas centrais termoeletricas a carvão, e o erro associado à vectorização feita nesta dissertação. ....  | 45 |
| Tabela 7.1: Evolução do número de centrais, potência instalada e energia elétrica produzida no conjunto de centrais termoeletricas a gás natural estudadas em Portugal continental entre 2015 e 2018, inclusive, bem como as percentagens da energia elétrica total produzida com fonte conhecida e com fonte assumida. ....   | 48 |
| Tabela 7.2: Listagem de material utilizado na construção de uma central com potência nominal de 200 MW e tempo de vida de 30 anos tal como descrito no relatório da NREL sobre o ciclo de vida de centrais termoeletricas a gás natural nos EUA <sup>[R.18]</sup> .....  | 49 |
| Tabela 7.3: Listagem de material utilizado na construção de uma central termoeletrica a gás natural com potência nominal de 620 MW e tempo de vida de 30 anos tal como descrito no estudo relativo à análise do ciclo de vida da produção de eletricidade por via de várias fontes energéticas nos EUA <sup>[R.32]</sup> ..... | 49 |
| Tabela 7.4: Lista de fatores de conversão utilizados, calculados a partir dos consumos analisados para as centrais termoeletricas a gás natural presentes nas declarações ambientais da EDP <sup>[R.15], [R.16]</sup> .....  | 51 |
| Tabela 7.5: Fatores de emissão direta e total médio calculado anualmente para centrais termoeletricas a gás natural e a média dos seus valores. ....   | 54 |
| Tabela 7.6: Evolução da área ocupada para produção de energia elétrica através de centrais termoeletricas a gás natural durante o período de estudo, 2015 a 2018, inclusive, e a sua ocupação percentual da área de Portugal continental <sup>[R.27]</sup> .....   | 55 |
| Tabela 7.7: Comparação da área total obtida e área real ocupada pelas centrais termoeletricas a carvão, e o erro associado à vectorização feita nesta dissertação. ....  | 55 |
| Tabela 8.1: Evolução do número de centrais, potência instalada e energia elétrica produzida no conjunto de centrais eólicas estudadas em Portugal continental entre 2015 e 2018, inclusive, bem como as percentagens da energia elétrica total produzida com fonte conhecida e com fonte assumida. ....                        | 58 |

|   |    |
|---|----|
| Tabela 8.2: Listagem de material utilizado para construção de uma central com potência nominal de 21 MW e tempo de vida de 20 anos tal como descrito no projeto onde são utilizadas turbinas eólicas de aço no estudo de análise ao ciclo de vida de centrais eólicas onshore no Brasil <sup>[R.33]</sup> .....                                     | 59 |
| Tabela 8.3: Listagem de material utilizado para construção de uma central com potência nominal de 21 MW e tempo de vida de 20 anos tal como descrito no projeto onde são utilizadas turbinas eólicas de betão no estudo de análise ao ciclo de vida de centrais eólicas onshore no Brasil <sup>[R.33]</sup> .....                                   | 59 |
| Tabela 8.4: Listagem de material utilizado na construção de uma central eólica com potência nominal de 2,5 MW e tempo de vida de 20 anos tal como descrito no estudo relativo à análise do ciclo de vida de centrais eólicas onshore e offshore teóricas, baseadas em dados da Siemens Wind Power <sup>[R.34]</sup> .....                           | 60 |
| Tabela 8.5: Listagem de material utilizado na construção de uma central eólica com potência nominal de 50 MW e tempo de vida de 20 anos tal como descrito no estudo de análise do ciclo de vida da produção de eletricidade por uma central eólica onshore, conduzido pela Vestas <sup>[R.35]</sup> .....   | 60 |
| Tabela 8.6: Listagem dos consumos contabilizados nesta dissertação, presentes na fase de operação de uma central eólica com potência nominal de 50 MW e tempo de vida de 20 anos, tal como descrito no estudo de análise do ciclo de vida da produção de eletricidade por uma central eólica onshore, conduzido pela Vestas <sup>[R.35]</sup> ..... | 62 |
| Tabela 8.7: Fator de emissão total médio calculado anualmente para centrais eólicas e a sua média de valores. ....  | 64 |
| Tabela 8.8: Evolução da área ocupada para produção de energia elétrica através de centrais eólicas durante o período de estudo, 2015 a 2018, inclusive, e a sua ocupação percentual da área de Portugal continental <sup>[R.27]</sup> .....   | 65 |
| Tabela 8.9: Comparação entre os valores de área geográfica ocupada obtidos nesta dissertação e o intervalo de valores obtido para centrais eólicas onshore e offshore no Reino Unido. ....  | 65 |
| Tabela 9.1: Evolução do número de centrais, potência instalada e energia elétrica produzida no conjunto de centrais solar fotovoltaicas estudadas em Portugal continental entre 2015 e 2018, inclusive, bem como as percentagens da energia elétrica total produzida com fonte conhecida e com fonte assumida. ....                                 | 67 |
| Tabela 9.2: Listagem de material utilizado na construção de uma central solar fotovoltaica com potência nominal de 0,001 MW e tempo de vida de 25 anos tal como descrito no estudo relativo à análise do ciclo de vida de sistemas solar fotovoltaicos na China <sup>[R.36]</sup> .....   | 69 |
| Tabela 9.3: Listagem de material utilizado na construção de uma central solar fotovoltaica com potência nominal de 0,025 MW e tempo de vida de 25 anos tal como descrito no estudo relativo à análise do ciclo de vida de sistemas solar fotovoltaicos na Índia <sup>[R.37]</sup> .....   | 69 |
| Tabela 9.4: Listagem dos consumos contabilizados nesta dissertação, presentes na fase de operação de uma central solar fotovoltaica de alta concentração com potência nominal de 0,053 MW e tempo de vida de 30 anos, tal como descrito no estudo de análise do ciclo de vida de vários sistemas solar fotovoltaicos <sup>[R.38]</sup> .....        | 71 |

|  |    |
|--|----|
| Tabela 9.5: Fator de emissão total médio calculado anualmente para centrais solar fotovoltaicas e a sua média de valores.....  | 73 |
| Tabela 9.6: Evolução da área ocupada para produção de energia elétrica através de centrais solar fotovoltaicas durante o período de estudo, 2015 a 2018, inclusive, e a sua ocupação percentual da área de Portugal continental <sup>[R.27]</sup> . .... | 74 |
| Tabela 9.7: Comparação entre a área total ocupada calculada para centrais solar fotovoltaicas e a área teoricamente necessária para produzir a mesma quantidade de energia, e o erro associado aos valores da área ocupada. ....                         | 75 |

## Nomenclatura e simbologia

$A_{eletricidade_k}$ : Área total ocupada para produção de energia elétrica em Portugal continental, num dado ano k.

$A_{eletricidade_{med}}$ : Área total média ocupada para produção de energia elétrica em Portugal continental no período estudado nesta dissertação.

AIA: Avaliação de impacte ambiental.

APA: Agência Portuguesa do Ambiente.

APREN: Associação Portuguesa de Energias Renováveis.

$A_{PT_{cont}}$ : Área de Portugal continental.

$A_{tech_{APA_k}}$ : Área geográfica vetorizada pela APA, utilizada para análise do erro existente nos valores de área ocupada obtidos nesta dissertação, num dado ano k.

$A_{tech_{central_k}}$ : Área ocupada por uma central de uma dada tecnologia, num dado ano k.

$A_{tech_{comp_k}}$ : Área geográfica vetorizada para as centrais hidroelétricas com albufeira de reserva que pode ser comparada com área vetorizada pela APA, num dado ano k.

$A_{tech_k}$ : Área total ocupada por uma dada tecnologia, num dado ano k.

$A_{tech_{lit_k}}$ : Valor de área real ocupada obtido através da literatura.

$A_{tech_{med}}$ : Área total média ocupada por uma dada tecnologia no período estudado nesta dissertação.

$\left(\frac{A_{tech}}{E_{tech_{total}}}\right)_k$ : Razão entre a área ocupada por uma dada tecnologia e a energia elétrica produzida associada à mesma, num dado ano k.

$\left(\frac{A_{tech}}{E_{tech_{total}}}\right)_{med}$ : Valor da razão entre a área ocupada por uma dada tecnologia e a energia elétrica produzida associada à mesma para o período estudado nesta dissertação.

$\left(\frac{A_{tech}}{P_{tech}}\right)_k$ : Razão entre a área ocupada por uma dada tecnologia e a potência instalada associada à mesma, num dado ano k.

$\left(\frac{A_{tech}}{P_{tech}}\right)_{med}$ : Valor da razão entre a área ocupada por uma dada tecnologia e a potência instalada associada à mesma para o período estudado nesta dissertação.

CH<sub>4</sub>: Metano.

CO<sub>2</sub>: Dióxido de carbono.

DGEG: Direção Geral de Energia e Geologia.

$E_{mix\ elétrico_k}$ : Energia elétrica total do *mix* de geração de energia elétrica no ano k.

$E_{mix\ elétrico_{med}}$ : Valor médio da energia elétrica do *mix* de geração de energia elétrica no período estudado nesta dissertação.

$E_{tech_{central_{real}_k}}$  : Energia produzida por uma central onde são conhecidos os seus consumos na fase de operação, num dado ano k.

$E_{tech_{conh_k}}$  : Energia elétrica produzida por um tipo de tecnologia no ano k, com fonte conhecida.

$E_{tech_{conh\%_k}}$  : Percentagem da energia elétrica produzida por uma tecnologia no ano k que possui fonte conhecida.

$E_{tech_{desc_{centrais_k}}}$  : Energia elétrica produzida por uma central no ano k, tendo sido o seu valor estimado nesta dissertação.

$E_{tech_{desc_k}}$  : Energia elétrica produzida por um tipo de tecnologia no ano k, com fonte desconhecida.

$E_{tech_{desc\%_k}}$  : Percentagem da energia elétrica produzida por uma tecnologia no ano k que possui fonte desconhecida.

$E_{tech_{grupo_{centrais_k}}}$  : Energia elétrica produzida por uma central pertencente a um grupo de centrais hidroelétricas num dado ano k, sendo o seu valor estimado nesta dissertação.

$E_{tech_{grupo_k}}$  : Energia elétrica produzida por um grupo de centrais hidroelétricas, num dado ano k, sendo que este valor pertence já ao conjunto de valores de energia elétrica produzida com fonte conhecida para um dado ano k.

$E_{tech_{RE_{central_k}}}$  : Energia elétrica produzida em regime especial numa central, associada a um tipo de tecnologia, no ano k.

$E_{tech_{RE_{desc_{central_k}}}}$  : Energia elétrica produzida em regime especial por uma central no ano k, tendo sido o seu valor estimado nesta dissertação.

$E_{tech_{RO_{central_k}}}$  : Energia elétrica produzida em regime ordinário numa central, associada a um tipo de tecnologia, no ano k.

$E_{tech_{total_{central_k}}}$  : Energia elétrica total produzida numa central, associada a um tipo de tecnologia, no ano k.

$E_{tech_{total_k}}$  : Energia elétrica total produzida por um tipo de tecnologia no ano k.

$E_{tech_{total_{med}}}$  : Energia elétrica média produzida por uma dada tecnologia no período estudado nesta dissertação.

$E_{tech\%_{mix_k}}$  : Percentagem correspondente à energia elétrica produzida por uma tecnologia no *mix* de geração de energia elétrica de Portugal continental no ano k.

$E_{tech\%_{mix_{med}}}$  : Percentagem correspondente à energia elétrica produzida por uma tecnologia no valor médio do *mix* de geração de energia elétrica de Portugal continental no período em estudo.

E2p: Projeto Energias Endógenas de Portugal.

EDP: Energias de Portugal.



EEA: *European Environmental Agency*.

EPA: *Environment Protection Agency*.

$Erro_{A_{HE} \text{ albufeira}_k}$ : Erro existente nos valores obtidos para a área ocupada pelas centrais hidroelétricas com albufeira de reserva.

$Erro_{A_{TE} \text{ carvão}, TE_{gn}_k}$ : Erro existente nos valores obtidos para a área ocupada pelas centrais hidroelétricas com albufeira de reserva.

$Erro_{max_{tech}}$ : Margem de erro superior dos valores totais obtidos para a fase de construção de uma dada tecnologia.

$Erro_{min_{tech}}$ : Margem de erro inferior dos valores totais obtidos para a fase de construção de uma dada tecnologia.

$FC_{mat}_k$ : Fator de conversão utilizado para o estudo da fase de operação das centrais produtoras de energia elétrica em Portugal continental.

$FE_{dir_{mat}}$ : Fator de emissão direta associado a um dado material.

$FE_{direto_{mix \text{ elétrico}_k}}$ : Fator de emissão associado somente às emissões diretas produzidas pela queima do combustível fóssil principal utilizado para produção de energia elétrica das tecnologias presentes no *mix* de geração de energia elétrica de Portugal continental, num dado ano  $k$ .

$FE_{direto_{mix \text{ elétrico}_{med}}}$ : Fator de emissão associado somente às emissões diretas produzidas pela queima do combustível fóssil principal utilizado para produção de energia elétrica das tecnologias presentes no *mix* de geração de energia elétrica de Portugal continental no período estudado nesta dissertação.

$FE_{direto_{tech_{k,med}}}$ : Fator de emissão associado somente às emissões diretas da queima do combustível fóssil principal utilizado para produção de energia elétrica na fase de operação das centrais de uma dada tecnologia, num dado ano  $k$  ou o valor médio obtido nos anos estudados.

$FE_{ind_{mat}}$ : Fator de emissão indireta associado a um dado material.

$FE_{total_{mix \text{ elétrico}_k}}$ : Fator de emissão associado às emissões diretas e indiretas das fases de construção e operação das tecnologias presentes no *mix* de geração de energia elétrica de Portugal continental, num dado ano  $k$ .

$FE_{total_{mix \text{ elétrico}_{med}}}$ : Fator de emissão associado às emissões diretas e indiretas das fases de construção e operação das tecnologias presentes no *mix* de geração de energia elétrica de Portugal continental no período estudado nesta dissertação.

$FE_{total_{tech_{k,med}}}$ : Fator de emissão associado às emissões diretas e indiretas das fases de construção e operação de uma dada tecnologia, num dado ano  $k$  ou o valor médio obtido nos anos estudados.

$i$ : Um dado estudo utilizado como base para cálculo das emissões indiretas e diretas da fase de construção de uma dada tecnologia.

$Imp_{A_{tech\% \text{ eletricidade}_{med}}}$ : Impacto percentual do valor médio da área ocupada para produção de energia elétrica associada a uma dada tecnologia na área total média ocupada para produção de energia elétrica em Portugal continental no período estudado nesta dissertação.

$Imp_{techmat\%const_{ind;dir}}$  : Impacto das emissões indiretas ou diretas associadas a um material utilizado na fase de construção.

$Imp_{techmat\%oper_{ind;dir}}$  : Impacto das emissões indiretas ou diretas associadas a um material utilizado na fase de operação.

INEGI: Instituto de Ciências e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial.

IPCC: *Intergovernmental Panel on Climate Change*.

$j$ : O estudo, entre os vários utilizados, com maior variedade de materiais utilizados na fase de construção de uma dada tecnologia.

$k$ : Um dado ano dentro do período estudado nesta dissertação.

$M_{CO_2eqPT_{cont_{total}_k}}$  : Valor total das emissões de gases com efeito de estufa provenientes da produção de eletricidade, num dado ano  $k$ .

$M_{CO_2eqPT_{cont_{total}_{med}}}$  : Valor total médio das emissões de gases com efeito de estufa provenientes da produção de eletricidade, no período estudado nesta dissertação.

$M_{CO_2eqtechconst_{anual}_i}$  : Massa total de CO<sub>2</sub> equivalente emitido na fase de construção das centrais de uma dada tecnologia quando utilizados os dados do estudo  $i$ , repartida em partes iguais pelo tempo de vida disponibilizado no mesmo estudo.

$M_{CO_2eqtechconst_{anual}_{med}}$  : Valor médio da massa de CO<sub>2</sub> equivalente emitido anualmente na fase de construção das centrais de uma dada tecnologia obtida através dos vários estudos utilizados.

$M_{CO_2eqtechconst_{dir_{anual}_i}}$  : Massa de CO<sub>2</sub> equivalente correspondente às emissões diretas dos materiais utilizados na fase de construção das centrais de uma dada tecnologia quando utilizados os dados do estudo  $i$ , repartida em partes iguais pelo tempo de vida disponibilizado no mesmo estudo.

$M_{CO_2eqtechconst_{dir_{mat}_i}}$  : Massa de CO<sub>2</sub> equivalente emitida diretamente por um dos materiais utilizados na fase de construção das centrais de uma dada tecnologia quando utilizados os dados do estudo  $i$ .

$M_{CO_2eqtechconst_{em_{mat}_i}}$  : Valor de massa de CO<sub>2</sub> equivalente por unidade de potência instalada associado à utilização dos materiais ou a realização de processos de construção na fase de construção das centrais de uma dada tecnologia. Dados disponibilizados pelo próprio estudo  $i$ .

$M_{CO_2eqtechconst_{ind_{anual}_i}}$  : Massa de CO<sub>2</sub> equivalente correspondente às emissões indiretas dos materiais utilizados na fase de construção das centrais de uma dada tecnologia quando utilizados os dados do estudo  $i$ , repartida em partes iguais pelo tempo de vida disponibilizado no mesmo estudo.

$M_{CO_2eqtechconst_{ind_{mat}_i}}$  : Massa de CO<sub>2</sub> equivalente emitida indiretamente por um dos materiais utilizados na fase de construção das centrais de uma dada tecnologia quando utilizados os dados do estudo  $i$ .

$M_{CO_2eqtechconstind,dirmat_{anual_i}}$  : Massa de CO<sub>2</sub> equivalente emitido na fase de construção das centrais de uma dada tecnologia quando utilizados os dados do estudo i, repartido em partes iguais pelo tempo de vida disponibilizado no mesmo estudo.

$M_{CO_2eqtechconstind,dirmat_i}$  : Massa de CO<sub>2</sub> equivalente emitida indireta ou diretamente por um dos materiais utilizados na fase de construção das centrais de uma dada tecnologia quando utilizados os dados do estudo i.

$M_{CO_2eqtechoperdircomb\_prim_{k,med}}$  : Massa de CO<sub>2</sub> equivalente emitida diretamente pela queima do combustível fóssil principal utilizado para a produção de energia elétrica na fase de operação das centrais de uma dada tecnologia, seguindo o único estudo utilizado, num dado ano k ou o valor médio obtido nos anos estudados.

$M_{CO_2eqtechoperdir_{k,med}}$  : Massa de CO<sub>2</sub> equivalente correspondente às emissões diretas dos materiais utilizados na fase de operação das centrais de uma dada tecnologia, seguindo o único estudo utilizado, num dado ano k ou o valor médio obtido nos anos estudados.

$M_{CO_2eqtechoperdirmat_k}$  : Massa de CO<sub>2</sub> equivalente emitida diretamente por um dos materiais utilizados na fase de operação das centrais de uma dada tecnologia, seguindo o único estudo utilizado, num dado ano k.

$M_{CO_2eqtechoperind_{k,med}}$  : Massa de CO<sub>2</sub> equivalente correspondente às emissões indiretas dos materiais utilizados na fase de operação das centrais de uma dada tecnologia, seguindo o único estudo utilizado, num dado ano k ou o valor médio obtido nos anos estudados.

$M_{CO_2eqtechoperindmat_k}$  : Massa de CO<sub>2</sub> equivalente emitida indiretamente por um dos materiais utilizados na fase de operação das centrais de uma dada tecnologia, seguindo o único estudo utilizado, num dado ano k.

$M_{CO_2eqtechoperindmat_{k,med}}$  : Massa de CO<sub>2</sub> equivalente emitida indiretamente por um dos materiais utilizados na fase de operação das centrais de uma dada tecnologia, seguindo o único estudo utilizado, num dado ano k ou o valor médio obtido nos anos estudados.

$M_{CO_2eqtechoperind,dirmat_k}$  : Massa de CO<sub>2</sub> equivalente emitida indireta ou diretamente por um dos materiais utilizados na fase de operação das centrais de uma dada tecnologia, seguindo o único estudo utilizado, num dado ano k.

$M_{CO_2eqtechoperind,dirmat_{med}}$  : Valor médio da massa de CO<sub>2</sub> equivalente emitida indireta ou diretamente por um dos materiais utilizados na fase de operação das centrais de uma dada tecnologia, seguindo o único estudo utilizado, no período estudado nesta dissertação.

$M_{CO_2eqtechoperind,dirmat_{k,med}}$  : Massa de CO<sub>2</sub> equivalente emitida indireta ou diretamente por um dos materiais utilizados na fase de operação das centrais de uma dada tecnologia, seguindo o único estudo utilizado, num dado ano k ou o valor médio obtido nos anos estudados.

$M_{CO_2eqtechoper_{k,med}}$  : Massa de CO<sub>2</sub> equivalente emitido na fase de operação das centrais de uma dada tecnologia, seguindo o único estudo utilizado, num dado ano k ou o valor médio obtido nos anos estudados.

$M_{CO_2eqtech_{total_k}}$  : Massa total de CO<sub>2</sub> equivalente emitido por uma dada tecnologia, num dado ano k.

$M_{CO_2eqtech_{total_{med}}}$  : Valor médio da massa total de CO<sub>2</sub> equivalente emitido por uma dada tecnologia no período estudado nesta dissertação.

$n$ : Número de anos estudados nesta dissertação.

N<sub>2</sub>O: Óxido nitroso.

NREL: *National Renewable Energy Laboratory*.

$Ocupação\ do\ país_k$ : Percentagem de ocupação de Portugal continental por um tipo de tecnologia, num dado ano k.

$Ocupação\ do\ país_{med}$ : Percentagem média de ocupação de Portugal continental por um tipo de tecnologia no período estudado nesta dissertação.

OSM – *Open street map*

$P_{central_i}$ : Potência instalada na central analisada por um dado estudo i.

$P_{central_{grupo_k}}$ : Potência instalada associada a uma das centrais num grupo de centrais hidroelétricas, num dado ano k.

$P_{tech_{central_{conh_k}}}$ : Potência instalada numa central, associada a um tipo de tecnologia, onde a energia elétrica produzida nela é conhecida, num dado ano k.

$P_{tech_{central_{desc_k}}}$ : Potência instalada numa central, associada a um tipo de tecnologia, onde a energia elétrica produzida nela é desconhecida, num dado ano k.

$P_{tech_k}$ : Potência instalada associada a um tipo de tecnologia, num dado ano k.

$Percentagem_{A_{HE\ albufeira_{comp_k}}}$  : Percentagem da área geográfica vetorizada para as centrais hidroelétricas com albufeira de reserva que pode ser comparada com área vetorizada pela APA, num dado ano k.

$Q_{mat}$ : Quantidade de material utilizado nesta dissertação.

$Q_{mat_i}$ : Quantidade de material utilizado num dado estudo i.

$Q_{mat_{real_k}}$  : Valor real da quantidade de material utilizado, num dado ano k, na fase de operação de uma central.

REN: Redes Energéticas Nacionais.

SF<sub>6</sub>: Fluoreto de enxofre (VI).

SIG: Sistemas de Informação Geográfica.

SNIAmb: Sistema Nacional de Informação Ambiental.

*Tempo de vida<sub>i</sub>*: Tempo de vida estimado para a central presente num dado estudo i.

# Índice

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1.    | Introdução.....  | 1  |
| 1.1   | Enquadramento histórico.....   | 1  |
| 1.2   | Fator de emissão.....  | 1  |
| 1.3   | Área ocupada.....  | 2  |
| 1.4   | Objetivos .....  | 2  |
| 1.5   | Estado da arte .....   | 3  |
| 1.6   | Organização do documento .....   | 3  |
| 2.    | Metodologia.....   | 4  |
| 2.1   | Produção de eletricidade .....   | 4  |
| 2.1.1 | Centrais termoelétricas a carvão, e a gás natural.....                 | 4  |
| 2.1.2 | Centrais hidroelétricas com albufeira de reserva, e a fio-de-água..... | 5  |
| 2.1.3 | Centrais eólicas e solar fotovoltaicas .....                           | 5  |
| 2.1.4 | Valores totais.....  | 5  |
| 2.2   | Emissões de gases com efeito de estufa .....                           | 6  |
| 2.2.1 | Fase de construção.....  | 6  |
| 2.2.2 | Fase de operação .....   | 8  |
| 2.2.3 | Análise de resultados.....   | 9  |
| 2.2.4 | Fatores de emissão.....  | 9  |
| 2.3   | Área geográfica .....  | 10 |
| 2.3.1 | Área ocupada.....  | 10 |
| 2.3.2 | Análise de resultados.....   | 11 |
| 2.4   | Resultados relativos a Portugal continental.....                       | 11 |
| 2.4.1 | Emissões de gases com efeito de estufa .....                           | 11 |
| 2.4.2 | Fatores de emissão.....  | 12 |
| 2.4.3 | Área ocupada.....  | 12 |
| 3.    | Produção de eletricidade .....   | 13 |
| 3.1   | Fontes de energia não renováveis.....                                  | 14 |
| 3.2   | Fontes de energia renováveis .....                                     | 15 |
| 3.3   | Mix elétrico em Portugal continental .....                             | 15 |
| 4.    | Centrais hidroelétricas com albufeira.....                             | 18 |
| 4.1   | Emissões na fase de construção.....                                    | 19 |
| 4.2   | Emissões na fase de operação .....                                     | 20 |
| 4.3   | Análise do perfil de emissões anuais.....                              | 22 |
| 4.4   | Fator de emissão.....  | 23 |
| 4.5   | Área ocupada.....  | 23 |

|  |    |
|--|----|
| 4.6 Erro associado à área ocupada.....                     | 25 |
| 4.7 Análise à área ocupada .....                           | 25 |
| 5. Centrais hidroelétricas a fio-de-água.....              | 28 |
| 5.1 Emissões na fase de construção.....                    | 29 |
| 5.2 Emissões na fase de operação .....                     | 31 |
| 5.3 Análise do perfil de emissões anuais.....              | 32 |
| 5.4 Fator de emissão.....                                  | 33 |
| 5.5 Área ocupada.....                                      | 33 |
| 5.6 Erro associado à área ocupada.....                     | 35 |
| 5.7 Análise à área ocupada .....                           | 35 |
| 6. Centrais termoeletricas a carvão.....                   | 37 |
| 6.1 Emissões na fase de construção.....                    | 38 |
| 6.2 Emissões na fase de operação .....                     | 40 |
| 6.3 Análise do perfil de emissões anuais.....              | 42 |
| 6.4 Emissões diretas para a produção de eletricidade ..... | 43 |
| 6.5 Fator de emissão.....                                  | 43 |
| 6.6 Área ocupada.....                                      | 44 |
| 6.7 Erro associado à área ocupada.....                     | 45 |
| 6.8 Análise à área ocupada .....                           | 45 |
| 7. Centrais termoeletricas a gás natural.....              | 48 |
| 7.1 Emissões na fase de construção.....                    | 49 |
| 7.2 Emissões na fase de construção.....                    | 51 |
| 7.3 Análise do perfil de emissões anuais.....              | 52 |
| 7.4 Emissões diretas para a produção de eletricidade ..... | 53 |
| 7.5 Fator de emissão.....                                  | 53 |
| 7.6 Área ocupada.....                                      | 54 |
| 7.7 Erro associado à área ocupada.....                     | 55 |
| 7.8 Análise à área ocupada .....                           | 55 |
| 8. Centrais eólicas.....                                   | 58 |
| 8.1 Emissões na fase de construção.....                    | 59 |
| 8.2 Emissões na fase de construção.....                    | 61 |
| 8.3 Análise do perfil de emissões anuais.....              | 63 |
| 8.4 Fator de emissão .....                                 | 63 |
| 8.5 Área ocupada .....                                     | 64 |
| 8.6 Erro associado à área ocupada.....                     | 65 |
| 8.7 Análise à área ocupada .....                           | 65 |

|  |     |
|--|-----|
| 9. Centrais solar fotovoltaicas .....  | 67  |
| 9.1 Emissões na fase de construção.....  | 68  |
| 9.2 Emissões na fase de operação .....   | 71  |
| 9.3 Análise do perfil de emissões anuais.....  | 72  |
| 9.4 Fator de emissão.....  | 73  |
| 9.5 Área ocupada.....  | 74  |
| 9.6 Erro associado à área ocupada.....   | 75  |
| 9.7 Análise à área ocupada .....   | 75  |
| 10. Resultados totais.....   | 77  |
| 10.1 Emissões de gases com efeito de estufa em Portugal continental .....                        | 77  |
| 10.2 Fator de emissão.....   | 79  |
| 10.3 Comparação dos fatores de emissão total calculados com valores tabelados por tecnologia.... | 82  |
| 10.4 Análise do mix elétrico português com os valores calculados .....                           | 83  |
| 10.5 Área ocupada.....   | 84  |
| 10.6 Análise à área ocupada .....  | 86  |
| 11. Conclusão .....  | 89  |
| 11.1 Desenvolvimentos futuros .....  | 91  |
| Referências .....  | 93  |
| Anexos.....  | 99  |
| Anexo A .....  | 99  |
| Anexo B.....   | 101 |
| Anexo C.....   | 102 |



# 1. Introdução

## 1.1 Enquadramento histórico

Desde a primeira revolução industrial que a população humana tem procurado métodos de produção de energia cada vez mais eficientes de modo a sustentar o progresso tecnológico e o crescimento populacional observado desde esse período até à atualidade, mas apenas nas últimas décadas tem existido uma consciencialização relativamente às alterações ambientais causadas pelo ser humano, sendo a conexão entre a produção de energia e estas alterações escrutinada mais profundamente. Tanto o protocolo de Quioto de 1997 como o acordo de Paris de 2015 representam dois marcos importantes nesta mudança de atitude, assumindo, entre outros pontos-chave, um compromisso de reformular o setor energético de modo a limitar as emissões de gases com efeito de estufa para a atmosfera <sup>[R.1],[R.2]</sup>. Estes gases apresentam um papel importante no aquecimento global, aumentando a capacidade da atmosfera terrestre de capturar e manter tanto o calor vindo do Sol como o calor emitido pelo próprio planeta Terra. Destes, o mais prevalente é o  $CO_2$ , presente na grande parte das emissões de produção de energia, sendo, então, estas emissões expressas em valores de  $CO_{2eq}$ , convertendo habitualmente as emissões associadas a outros gases deste tipo a partir de convenções sobre o potencial de aquecimento global numa escala de 100 anos.

Com a evolução da tecnologia foram conseguidos outros métodos de produção de energia podendo estes dividir-se entre os que utilizam fontes energéticas não renováveis à escala humana, sendo estas constituídas por combustíveis fósseis, e as que utilizam fontes renováveis. Excluindo as centrais hidroelétricas com albufeira de reserva, que sempre constituíram um papel importante no sistema elétrico, este foi, durante um longo período de tempo, dominado por centrais com fontes de energia não renováveis. Em Portugal continental, apenas mais recentemente existiu uma maior penetração de novas fontes renováveis no *mix* de geração de energia elétrica, mais nomeadamente as centrais eólicas na década de 90 e as centrais solar fotovoltaicas após o começo do milénio, permitindo uma diminuição dos valores necessários de produção pelas centrais com fontes de energia não renováveis. Por fim, é também importante referir o crescimento das centrais hidroelétricas, tendo sido já referido o papel importantes das centrais com albufeira de reserva, que acompanharam desde o início o crescimento das centrais com fontes não renováveis, sendo, pouco tempo depois, acrescentadas as centrais hidroelétricas a fio de água ao *mix* de geração de energia elétrica do país. Esta evolução dos processos de produção de energia permitiu uma maior diversificação do *mix* de geração de energia elétrica Português e uma diminuição nas emissões de gases com efeito de estufa para a atmosfera, alterando o sistema de produção de energia elétrica tal como pretendido nas convenções de Quioto e Paris. De modo a comparar a evolução da quantidade de gases com efeito de estufa emitidos na produção de eletricidade não só numa base anual dentro de um país, mas também de país para país, é utilizada a razão entre estes dois valores, denominada de fator de emissão.

## 1.2 Fator de emissão

O fator de emissão de referência é o associado ao *mix* de geração de energia elétrica anual, sendo este calculado a partir de uma média ponderada dos fatores de emissão de cada tecnologia presente nesse mesmo *mix*. De modo a calcular estes valores, é necessário conhecer a eletricidade e a quantidade de emissões totais produzidas anualmente por tipo de tecnologia, sendo que estas emissões totais produzidas podem elas mesmas ser subdivididas em vários grupos. Destes, os mais importantes para esta dissertação correspondem à divisão pelas diversas fases da vida de uma central, sendo estas denominadas de fase de construção, operação, e desativação, e entre emissões indiretas e diretas. Estas duas subdivisões estão relacionadas pois em cada uma das fases são utilizados diversos materiais com

um fator de emissão associado, correspondente às emissões indiretas, que incluem os diversos mecanismos de modo a tornar o material utilizável na central. Para além disso, se o uso do material pela central produzir emissões suplementares, estas são categorizadas como emissões diretas e possuem fatores de emissão distintos dos utilizados nos cálculos das emissões indiretas. O fator de emissão do *mix* de geração de energia elétrica anual tabelado para cada país por entidades como a EEA <sup>[R.3]</sup> (Europa) ou APREN <sup>[R.4]</sup> (Portugal) têm apenas em conta as emissões diretas referentes à queima do combustível principal utilizado para produção de eletricidade na fase de operação.

### 1.3 Área ocupada

Com o crescimento populacional humano referido anteriormente, existiu também um aumento na pressão imposta no solo, uma comodidade finita, para sustentar esse crescimento, pois este tem de ser dividido em diversos espaços destinados a satisfazer as necessidades básicas humanas, como por exemplo em espaços para habitação, e para produção de alimento e de energia. Atividades como a agricultura têm levado a uma sobrecarga dos solos nas últimas décadas, utilizando os seus nutrientes mais rapidamente do que os processos naturais os conseguem repor, levando à destruição dos mesmos, impossibilitando o contínuo cultivo nesse local. Uma das soluções para combater a crescente pressão sobre o limitado terreno existente é o ordenamento do território, alocando o uso mais propício para cada espaço. Assim, quando é encontrado um local propício à produção de energia e nesse mesmo local existem indícios da possibilidade de instalação de duas tecnologias distintas, pode ser interessante conhecer as capacidades de instalação da potência nominal e de produção de eletricidade numa dada área de modo a facilitar a escolha a ser feita.

### 1.4 Objetivos

Esta dissertação tem dois objetivos principais. O primeiro passa por uma análise detalhada das emissões produzidas por cada tipo de central de modo a calcular um fator de emissão do *mix* de geração de energia elétrica português mais próximo da realidade, intitulado de fator de emissão total. Para este estudo foi necessário impor limites na área geográfica por este abrangida, sendo apenas estudadas as centrais de produção de eletricidade ativas em Portugal continental entre os anos de 2015 e 2018, inclusive, contabilizando um total de 528 centrais. Destas, os tipos em estudo incluem as termoelétricas a gás natural e a carvão, hidroelétricas a fio de água e com albufeira de reserva, eólicas, e solar fotovoltaicas. Em termos de emissões foram incluídas apenas as fases de construção e de operação, tendo sido calculadas as emissões indiretas e diretas para cada material utilizado, sendo que nesta dissertação, as emissões indiretas incluem todo o processo da extração até ao material estar pronto para ser utilizado pela central, excluindo, assim, o transporte do mesmo devido a não ser conhecida a origem do mesmo. Simultaneamente, foi calculado um fator de emissão direto, que inclui apenas as emissões diretas da queima do combustível fóssil principal utilizado para produção de eletricidade. Por fim, foi feita uma comparação entre estes dois fatores calculados e o fator de emissão tabelado.

O segundo objetivo corresponde ao estudo da lista completa de centrais já referida, mapeando o perímetro assumido de cada uma com o auxílio de um programa de informação geográfica, neste caso o qGIS, obtendo, posteriormente, uma área relativa total para cada tipo de tecnologia utilizada e total para Portugal em cada um dos anos estudados. O passo final neste objetivo inclui uma análise às razões de área ocupada por potência instalada, e por eletricidade produzida, úteis numa implementação de centrais elétricas num espaço limitado.

## 1.5 Estado da arte

Foi criada uma base de conhecimentos para esta dissertação fundada em diversos estudos e documentos publicados ao longo dos anos, prestando estes um maior grau de veracidade aos valores obtidos. Em termos de listagem das centrais, o projeto e2p <sup>[R.5]</sup> representa uma grande base de dados para este estudo, listando as centrais renováveis ativas em Portugal, apresentando, também, outras informações importantes referentes a estas tal como o ano de construção, a potência instalada e a localização geográfica. O centro de informação da REN <sup>[R.6]</sup> e as declarações ambientais da EDP <sup>[R.7],[R.8],[R.9],[R.10],[R.11],[R.12],[R.13],[R.14],[R.15],[R.16]</sup> permitiram a obtenção da listagem de centrais com fontes de energia não-renováveis, complementando a listagem feita pelo projeto e2p. No mesmo centro de informações também está disponível a energia elétrica total produzida por tipo de tecnologia anualmente, e nas declarações ambientais estão declarados os valores de energia elétrica produzida e de consumo específicos a parte das centrais listadas, permitindo, assim, um estudo das fontes de energia do sistema elétrico de Portugal continental. Relativamente aos inventários de consumo quer para a fase de construção, quer para a fase de operação, existe uma extensa bibliografia disponível sobre análises ao ciclo de vida de centrais, tais como as análises feitas às centrais termoelétricas pela NREL <sup>[R.17],[R.18]</sup> ou o estudo completo publicado pelo Ecoinvent <sup>[R.19]</sup> referente aos vários tipos de tecnologias presentes nos sistemas atuais na Suíça e outros países Europeus, que permitem conhecer as quantidades necessárias de material para a construção e funcionamento de cada tipo de central. É importante referir que estes estudos, normalmente, são focados apenas num pequeno grupo de centrais representativas de cada tipo de tecnologias e, assim, quando são aplicados a todo o sistema elétrico de um país, estes valores podem variar consoante as características específicas do local onde for construída a central em estudo, reforçando a necessidade de utilizar vários estudos de modo a obter um valor mais realista. De modo a conhecer os fatores de emissão associados às emissões indiretas e diretas a cada material, estes podem ser obtidos a partir de várias fontes embora exista uma certa variabilidade nos valores tabelados e certos materiais não possuam fatores de emissão tabelados. A tabela disponível pela cidade de Winnipeg, Canada <sup>[R.20]</sup>, inclui grande parte dos valores necessários para este estudo, sendo os restantes obtidos a partir de outros estudos de modo a tentar obter valores para os fatores de emissão de todos os materiais referidos nos estudos às centrais. Por fim, existem também valores tabelados pela Ecoinvent e IPCC, obtidos a partir de um terceiro estudo <sup>[R.21]</sup>, relativos aos fatores de emissão associados a cada tipo de tecnologia, incluindo, tal como nesta dissertação, as emissões indiretas e indiretas presentes nas fases de construção e operação do tempo de vida de uma central, que foram utilizados para comparar o grau de veracidade dos valores finais obtidos.

Relativamente à área ocupada para produção de eletricidade não foram utilizados estudos para calcular a área ocupada por cada central, tendo sido preferida a utilização de mapas e imagens de satélite disponibilizadas pela Google e OSM de modo a obter valores próximos da realidade existente em cada central estudada. De modo a verificar os valores obtidos foram utilizados três métodos diferentes, utilizando polígonos vetorizados disponibilizados pela APA <sup>[R.57]</sup>, declarações ambientais <sup>[R.13],[R.14],[R.15],[R.16]</sup> e documentos de AIA <sup>[R.58]</sup>, e estudos relativos à razão área ocupada/energia elétrica produzida <sup>[R.25],[R.59],[R.60]</sup>, de onde foi possível extrair a área geográfica teoricamente necessária para uma dada tecnologia.

## 1.6 Organização do documento

Por fim, é importante referir que esta dissertação foi redigida de modo a facilitar a leitura e consulta dos resultados obtidos associados a cada tipo de central estudado, sendo posteriormente feita a comparação entre estes, e um estudo completo relativo a Portugal continental de modo a ser possível compreender mais facilmente a situação observada no país. Por fim, não são apresentados valores relativos a centrais específicas, escolhendo por sua vez uma observação mais holística de cada tipo de tecnologia.

## 2. Metodologia

### 2.1 Produção de eletricidade

Primeiramente, foi necessário tratar os dados referentes à produção de energia elétrica produzida em Portugal continental por cada uma das seis tecnologias em estudo. Assumindo que apenas as centrais estudadas nesta dissertação produziram eletricidade entre 2015 e 2018, a potência total instalada para cada uma das tecnologias presentes num dado ano é dada pela seguinte expressão:

$$P_{tech_k}[W] = \sum \left( P_{tech_{central_{conh_k}}} \right) [W] + \sum \left( P_{tech_{central_{desc_k}}} \right) [W] \quad [2.1]$$

Devido à energia elétrica produzida anualmente não ser um dado tipicamente publicado, a separação dos valores de potência instalada entre centrais onde os dados referentes à eletricidade são ou não conhecidos permitiu estimar os valores de eletricidade produzida anualmente em falta. Dado que estes valores anuais totais para cada tecnologia apresentaram dificuldades diferentes no seu tratamento, foram utilizados três métodos distintos de modo a conseguir valores associados a cada central que, apesar de não serem representados nesta dissertação, permitiram um estudo mais detalhado das emissões associadas a cada uma destas, e valores totais associados a cada tecnologia, permitindo a obtenção de valores de fator de emissão.

#### 2.1.1 Centrais termoelétricas a carvão, e a gás natural

Os dados referentes à energia elétrica produzida anualmente por centrais termoelétricas está dividida em regime ordinário e especial, sendo que apenas no primeiro regime é detalhada a eletricidade produzida por cada central. Para a separação do valor do regime especial foi necessário separar as centrais termoelétricas presentes na listagem a utilizar nesta dissertação entre os dois tipo de combustível fóssil utilizado e analisar as declarações ambientais disponibilizadas pela EDP, pertencentes às centrais termoelétricas a carvão e a gás natural, onde é possível obter o valor total anual de eletricidade produzida por parte das centrais estudadas num dado ano  $k$ . Com este novo valor foi possível obter a energia elétrica produzida em regime especial associado a cada central incluída nas declarações ambientais da EDP a partir da seguinte equação:

$$E_{tech_{total_{central_k}}}[Wh] = E_{tech_{RO_{central_k}}}[Wh] + E_{tech_{RE_{central_k}}}[Wh] \quad [2.2]$$

Para as centrais onde era desconhecido o seu valor de energia elétrica em regime ordinário foi considerado que este era equivalente a 0 Wh, e para as centrais onde o valor total era desconhecido, o valor referente ao regime especial foi estimado por:

$$E_{tech_{RE_{desc_{central_k}}}}[Wh] = E_{tech_{RE_{desc_k}}}[Wh] \times \frac{P_{tech_{central_{desc_k}}}[W]}{\sum \left( P_{tech_{central_{desc_k}}} \right) [W]} \quad [2.3]$$

A equação [2.3] permite, assim, repartir a energia elétrica com fonte desconhecida pelas diversas centrais com valores em falta em função da potência instalada apenas nessas centrais.

Por fim, para estes tipos de centrais restou apenas obter uma expressão que permitisse obter o valor total de eletricidade produzida anualmente associado a cada tecnologia, a equação [2.4].

$$E_{tech_{total_k}}[Wh] = \sum \left( E_{tech_{total_{central_k}}} \right) [Wh] \quad [2.4]$$

### 2.1.2 Centrais hidroelétricas com albufeira de reserva, e a fio-de-água

Os dados relativos à energia obtida através de fontes hídricas está novamente separada entre regime ordinário e regime especial, sendo que apenas o primeiro faz a diferenciação entre centrais com albufeira e centrais a fio-de-água. Nesta dissertação também foi feita a divisão entre estes dois tipos de centrais devido à grande diferença no método de construção destas, embora tenha sido feita uma reclassificação das centrais obtidas a partir da base de dados do projeto e2p <sup>[R.5]</sup>. Enquanto nesse projeto a divisão era feita com base no valor da potência instalada, onde centrais com valores inferiores a 10 MW de potência instalada eram designadas como pequenas centrais hidroelétricas (PCH) e as com valores superiores como grande hídrica, nesta dissertação a divisão foi feita com uma análise caso a caso, tendo sido tido em conta a existência de albufeiras pertencentes à central ou a montante da mesma, visto que estas também possuem capacidade de armazenamento para todas as centrais a jusante. Devido à reclassificação do tipo de central de algumas destas neste estudo, tanto os valores de regime ordinário como de regime especial referentes a centrais hidroelétricas foram agrupados sem ser, primeiramente, feita a diferenciação entre centrais hidroelétricas com albufeira e a fio de água. A partir das declarações ambientais da EDP <sup>[R.7],[R.8],[R.9],[R.10],[R.11],[R.12]</sup> foram obtidos valores anuais de eletricidade produzida para centrais específicas ou grupos de centrais deste estudo. No segundo caso foi necessário utilizar a seguinte equação para estimar a divisão da energia elétrica do grupo em função da potência instalada num dado ano  $k$ .

$$E_{tech_{grupo_{central_k}}}[Wh] = E_{tech_{grupo_k}}[Wh] \times \frac{P_{central_{grupo_k}}[W]}{\Sigma(P_{central_{grupo_k}})[W]} \quad [2.5]$$

Por fim, foi possível estimar a eletricidade não contabilizada nas declarações ambientais da EDP para o resto das centrais, também em função da potência instalada, e a energia elétrica total associada a cada uma das tecnologias hidroelétricas utilizando as equações [2.6] e [2.7], respetivamente.

$$E_{tech_{desc_{centrais_k}}}[Wh] = E_{tech_{desc_k}}[Wh] \times \frac{P_{tech_{central_{desc_k}}}[W]}{\Sigma(P_{tech_{central_{desc_k}}})[W]} \quad [2.6]$$

$$E_{tech_{total_k}}[Wh] = E_{tech_{conh_k}}[Wh] + E_{tech_{desc_k}}[Wh] \quad [2.7]$$

### 2.1.3 Centrais eólicas e solar fotovoltaicas

No caso das centrais eólicas e solar fotovoltaicas, sendo que não foram encontrados valores tabelados para qualquer central estudada, o total da energia elétrica produzida apresentada na Tabela 3.3 foi dividida pelas centrais em estudo, utilizando a equação [2.8], em função da potência instalada.

$$E_{tech_{desc_{centrais_k}}}[Wh] = E_{tech_{total_k}}[Wh] \times \frac{P_{tech_k}[W]}{\Sigma(P_{tech_k})[W]} \quad [2.8]$$

### 2.1.4 Valores totais

Após o tratamento dos valores de energia elétrica produzida em Portugal é possível obter informações relativas à percentagem de eletricidade produzida com origem conhecida ou estimada por cada uma das tecnologias nos quatro anos estudados.

$$E_{tech_{conh_{\%_k}}}[\%] = \frac{E_{tech_{conh_k}}[Wh]}{E_{tech_{total_k}}[Wh]} \times 100[\%] \quad [2.9]$$

$$E_{tech_{desc_{\%_k}}}[\%] = \frac{E_{tech_{desc_k}}[Wh]}{E_{tech_{total_k}}[Wh]} \times 100[\%] \quad [2.10]$$

Para além desses valores, é possível obter tanto os valores anuais de energia elétrica produzida pelo mix elétrico como os valores médios de energia produzida por tecnologia e por todo o mix durante o período estudado. Estes conjuntos de valores foram obtidos pelas três seguintes equações:

$$E_{tech_{total_{med}}}[Wh] = Média(E_{tech_{total_k}})[Wh] \quad [2.11]$$

$$E_{mix\ elétrico_k}[Wh] = \Sigma(E_{tech_{total_k}})[Wh] \quad [2.12]$$

$$E_{mix\ elétrico_{med}}[Wh] = Média(E_{mix\ elétrico_k})[Wh] \quad [2.13]$$

Por fim, de modo a estudar o fator de emissão anual e médio associado ao mix elétrico de Portugal continental é necessário conhecer a contribuição que cada tecnologia utilizada tem nesse mix. Para esse efeito foram utilizadas as equações [2.14] e [2.15].

$$E_{tech\%mix_k}[\%] = \frac{E_{tech_{total_k}}[Wh]}{E_{mix\ elétrico_k}[Wh]} \times 100[\%] \quad [2.14]$$

$$E_{tech\%mix_{med}}[\%] = \frac{E_{tech_{total_{med}}}[Wh]}{E_{mix\ elétrico_{med}}[Wh]} \times 100[\%] \quad [2.15]$$

## 2.2 Emissões de gases com efeito de estufa

### 2.2.1 Fase de construção

Para o cálculo das emissões de gases com efeito de estufa na fase de construção foram tidos em conta vários estudos diferentes de modo a obter valores mais próximos da realidade. Destes estudos foram retiradas listas de materiais utilizados na construção de centrais localizadas em vários pontos do globo, sendo cada lista aplicada às centrais em estudo. Muitos dos estudos apresentaram valores de quantidade de material utilizado em termos de potência instalada da central original sendo assim, primeiro necessário normalizar os consumos em termos unitários de potência instalada.

$$Q_{mat} \left[ \frac{kg\ mat}{W}; \frac{Wh\ mat}{W}; \frac{m^3\ mat}{W} \right] = \frac{Q_{mat_i} [kg\ mat; Wh\ mat; m^3\ mat]}{P_{central_i} [W]} \quad [2.16]$$

De modo a obter o valor de emissões reais nestes estudos, foram tidas em conta as emissões indiretas e diretas de cada material e, para isso, foi necessário analisar o propósito da utilização de cada material. Para as emissões indiretas foi tida em conta o fator de emissão associado a todo o processo desde da produção de cada material utilizado até à sua chegada à central, excluindo o seu transporte, fatores estes apresentados na tabela do Anexo A, e a potência instalada em cada tecnologia, num dado ano k, sendo as emissões indiretas de gases com efeito de estufa da fase de construção associadas a cada material descrito pelo estudo i dadas pela expressão:

$$M_{CO_{2eq}tech_{const}ind_{mat_i}} [kg\ CO_{2eq}] = Q_{mat} \left[ \frac{kg\ mat}{W}; \frac{Wh\ mat}{W}; \frac{m^3\ mat}{W} \right] \times P_{tech_k} [W] \times FE_{ind_{mat}} \left[ \frac{kg\ CO_{2eq}}{kg\ mat}; \frac{kg\ CO_{2eq}}{Wh\ mat}; \frac{kg\ CO_{2eq}}{m^3\ mat} \right] \quad [2.17]$$

No caso da eletricidade consumida na construção das centrais foi tido em conta o ano em que cada uma das centrais começou a sua produção de energia elétrica utilizando o fator de emissão associado à eletricidade nesse ano em Portugal, disponível no Anexo C. Para as centrais contruídas antes do ano 2000 foi considerado um valor estático equivalente ao fator de emissão do ano 2000.

É importante também referir que nalguns dos estudos utilizados, o valor apresentado é já referente à quantidade de massa de  $CO_{2eq}$  emitida em função de 1 MW de potência instalada associada a cada um

dos materiais utilizados no total da fase de construção. Assim, foi apenas utilizada a equação [2.18] de modo a obter os valores totais de emissões indiretas de gases com efeito de estufa da fase de construção associadas a esses materiais.

$$M_{CO_2eqtechconstindmat_i} \left[ kg CO_{2eq} \right] = M_{CO_2eqtechconstemat_i} \left[ \frac{kg CO_{2eq}}{W} \right] \times P_{tech_k} [W] \quad [2.18]$$

Para as emissões diretas, foi tido em conta se o uso de cada material emite quantidades suplementares de gases com efeito de estufa para além dos já contabilizados nas emissões indiretas. Para estas emissões foi seguida uma metodologia semelhante à utilizada para as emissões indiretas, mas foi necessário utilizar fatores de emissão relevantes à utilização do material em estudo, fatores estes disponíveis no Anexo B. Assim, foi obtida a seguinte equação:

$$M_{CO_2eqtechconstdirmat_i} \left[ kg de CO_2 \right] = Q_{mat} \left[ \frac{kg mat}{W}; \frac{m^3 mat}{W}; \frac{Wh mat}{W} \right] \times P_{tech_k} [W] \times FE_{dirmat} \left[ \frac{kg CO_{2eq}}{kg mat}; \frac{kg CO_{2eq}}{m^3 mat}; \frac{kg CO_{2eq}}{Wh mat} \right] \quad [2.19]$$

Tendo em conta que os valores obtidos a partir dos diversos estudos estão associados a tempos de vida diferentes, de modo a fazer uma análise do impacto da construção destas centrais num dado ano, foi necessário normalizar estes para valores de emissão por ano, o que foi conseguido recorrendo à equação [2.20].

$$M_{CO_2eqtechconstind,dirmat_{anual_i}} \left[ \frac{kg CO_{2eq}}{ano} \right] = \frac{M_{CO_2eqtechconstind,dirmat_i} \left[ kg CO_{2eq} \right]}{Tempo de vida_i [ano]} \quad [2.20]$$

Agrupando todos os valores correspondentes as emissões indiretas e diretas anuais na fase de construção é possível obter valores correspondentes às emissões indiretas e diretas anuais totais associadas a uma dada tecnologia presente em Portugal continental, quando é seguido um dado estudo i. Estes cálculos estão representados nas equações [2.21] e [2.22], respetivamente.

$$M_{CO_2eqtechconstind_{anual_i}} \left[ \frac{kg CO_{2eq}}{ano} \right] = \sum \left( M_{CO_2eqtechconstindmat_{anual_i}} \right) \left[ \frac{kg CO_{2eq}}{ano} \right] \quad [2.21]$$

$$M_{CO_2eqtechconstdir_{anual_i}} \left[ \frac{kg CO_{2eq}}{ano} \right] = \sum \left( M_{CO_2eqtechconstdirmat_{anual_i}} \right) \left[ \frac{kg CO_{2eq}}{ano} \right] \quad [2.22]$$

A junção desses dois valores permite obter o valor total de emissões de gases com efeito de estufa na fase de construção de uma tecnologia associado a um estudo i.

$$M_{CO_2eqtechconst_{anual_i}} \left[ \frac{kg CO_{2eq}}{ano} \right] = M_{CO_2eqtechconstind_{anual_i}} \left[ \frac{kg CO_{2eq}}{ano} \right] + M_{CO_2eqtechconstdir_{anual_i}} \left[ \frac{kg CO_{2eq}}{ano} \right] \quad [2.23]$$

Por fim, calculando o valor médio dos valores obtidos a partir dos diferentes estudos utilizados, é possível obter uma estimativa de um valor mais realista correspondente às emissões indiretas e diretas associadas a cada material, aos totais das emissões indiretas e diretas, e ao total de emissões presentes na fase de construção.

### 2.2.2 Fase de operação

Para uma análise às emissões de gases com efeito de estufa na fase de operação, foram utilizados dois métodos distintos. Para os tipos de centrais onde eram parcialmente conhecidos os valores reais para os vários consumos anuais na fase de operação, tal como nas centrais hidroelétricas com albufeira de reserva, termoelétricas a carvão e a gás natural, provenientes das declarações ambientais da EDP, estes valores foram utilizados para criar uma tabela de fatores de conversão associados especificamente a essa tecnologia, permitindo, assim, estimar os consumos de todas as centrais. Estes fatores são dados pela expressão [2.24].

$$FC_{mat_k} \left[ \frac{kg \text{ mat}}{Wh}; \frac{Wh \text{ mat}}{Wh}; \frac{m^3 \text{ mat}}{Wh} \right] = \frac{\Sigma(Q_{mat_{real_k}})[kg \text{ mat}; Wh \text{ mat}; m^3 \text{ mat}]}{\Sigma(E_{tech_{central_{real_k}}})[Wh]} \quad [2.24]$$

No caso das tecnologias onde não eram conhecidos valores reais, nomeadamente as centrais hidroelétricas a fio-de-água, eólicas, e solar fotovoltaicas, foram, semelhantemente à fase de construção, utilizados estudos de modo a estimar os valores associados a estas. É de notar que todas as tecnologias estudadas, à exceção das centrais solar fotovoltaicas, que replicam a metodologia utilizada previamente, utilizam valores baseados na energia elétrica produzida anualmente, sendo as emissões indiretas e diretas anuais associadas a cada material utilizado calculadas a partir das seguintes expressões:

$$M_{CO_{2eq}techoper_{ind,mat_k}} \left[ \frac{kg \text{ CO}_{2eq}}{ano} \right] = FC_{mat_k} \left[ \frac{kg \text{ mat}}{Wh}; \frac{Wh \text{ mat}}{Wh}; \frac{m^3 \text{ mat}}{Wh} \right] \times E_{tech_{total_k}} \left[ \frac{Wh}{ano} \right] \times FE_{ind_{mat}} \left[ \frac{kg \text{ CO}_{2eq}}{kg \text{ mat}}; \frac{kg \text{ CO}_{2eq}}{Wh \text{ mat}}; \frac{kg \text{ CO}_{2eq}}{m^3 \text{ mat}} \right] \quad [2.25]$$

$$M_{CO_{2eq}techoper_{dir,mat_k}} \left[ \frac{kg \text{ CO}_{2eq}}{ano} \right] = FC_{mat_k} \left[ \frac{kg \text{ mat}}{Wh}; \frac{m^3 \text{ mat}}{Wh}; \frac{Wh \text{ mat}}{Wh} \right] \times E_{tech_{total_k}} \left[ \frac{Wh}{ano} \right] \times FE_{dir_{mat}} \left[ \frac{kg \text{ CO}_{2eq}}{kg \text{ mat}}; \frac{kg \text{ CO}_{2eq}}{m^3 \text{ mat}}; \frac{kg \text{ CO}_{2eq}}{Wh \text{ mat}} \right] \quad [2.26]$$

A partir destes valores é possível obter um valor médio de emissões de gases com efeito de estufa durante o período em estudo para cada material utilizado.

$$M_{CO_{2eq}techoper_{ind,dir,mat_{med}}} \left[ \frac{kg \text{ CO}_{2eq}}{ano} \right] = \frac{\Sigma_k^n \left( M_{CO_{2eq}techoper_{ind,dir,mat_k}} \right)}{n} \left[ \frac{kg \text{ CO}_{2eq}}{ano} \right] \quad [2.27]$$

Por fim, com estes três conjuntos de valores obtiveram-se os valores totais anuais e médios relativos as emissões indiretas, diretas e totais na fase de operação, utilizando as equações [2.28], [2.29] e [2.30], respetivamente.

$$M_{CO_{2eq}techoper_{ind,k,med}} \left[ \frac{kg \text{ CO}_{2eq}}{ano} \right] = \Sigma \left( M_{CO_{2eq}techoper_{ind,mat_k,med}} \right) \left[ \frac{kg \text{ CO}_{2eq}}{ano} \right] \quad [2.28]$$

$$M_{CO_{2eq}techoper_{dir,k,med}} \left[ \frac{kg \text{ CO}_{2eq}}{ano} \right] = \Sigma \left( M_{CO_{2eq}techoper_{dir,mat_k,med}} \right) \left[ \frac{kg \text{ CO}_{2eq}}{ano} \right] \quad [2.29]$$



$$M_{CO_2eqtechoper_{k,med}} \left[ \frac{kg \ CO_2eq}{ano} \right] = M_{CO_2eqtechoper_{ind_{k,med}}} \left[ \frac{kg \ CO_2eq}{ano} \right] + M_{CO_2eqtechoper_{dir_{k,med}}} \left[ \frac{kg \ CO_2eq}{ano} \right] \quad [2.30]$$

### 2.2.3 Análise de resultados

Com todos os conjuntos de valores obtidos nos subcapítulos 2.2.1 e 2.2.2, é possível analisar os impactos associados a cada material utilizado nas suas fases estudadas. Para isso, é necessário identificar o estudo  $j$ , correspondente ao estudo com o maior número de diferentes materiais utilizados. O cálculo de cada impacto é, então, descrito pelas duas seguintes equações correspondentes à fase de construção e operação, respetivamente.

$$Imp_{tech_{mat\%const_{ind,dir}}} [\%] = \frac{M_{CO_2eqtechconst_{ind,dir_{mat_j}}} \left[ \frac{kg \ de \ CO_2}{ano} \right]}{M_{CO_2eqtechconst_{anual_j}}} \left[ \frac{kg \ de \ CO_2}{ano} \right] \times 100 [\%] \quad [2.31]$$

$$Imp_{tech_{mat\%oper_{ind,dir}}} [\%] = \frac{M_{CO_2eqoper_{ind,dir_{mat_{med}}}} \left[ \frac{kg \ de \ CO_2}{ano} \right]}{M_{CO_2eqoper_{med}}} \left[ \frac{kg \ de \ CO_2}{ano} \right] \times 100 [\%] \quad [2.32]$$

Estes impactos podem também ser aplicados aos valores médios obtidos para cada fase no período estudado de modo a conhecer as emissões médias associadas a cada material.

Para estudar o desenvolvimento das emissões totais associadas a cada tecnologia ao longo dos anos em estudo é necessário calcular os valores totais observados em cada um dos anos e a sua média, utilizando as equações [2.33] e [2.34].

$$M_{CO_2eqtech_{total_k}} \left[ \frac{kg \ CO_2eq}{ano} \right] = M_{CO_2eqtechconst_{anual_{med}}} \left[ \frac{kg \ CO_2eq}{ano} \right] + M_{CO_2eqtechoper_k} \left[ \frac{kg \ CO_2eq}{ano} \right] \quad [2.33]$$

$$M_{CO_2eqtech_{total_{med}}} \left[ \frac{kg \ CO_2eq}{ano} \right] = M_{CO_2eqtechconst_{anual_{med}}} \left[ \frac{kg \ CO_2eq}{ano} \right] + M_{CO_2eqtechoper_{med}} \left[ \frac{kg \ CO_2eq}{ano} \right] \quad [2.34]$$

Nestes cálculos foi utilizado o valor médio para a fase de construção, obtido a partir de diversos estudos, sendo que devido a esse facto e ao serem utilizados três valores diferentes de fator de emissão indireta associados a alguns dos materiais utilizados, existiu uma margem de erro no valor total médio da fase de construção. Os valores mínimos e máximos desse erro foram calculados por:

$$Erro_{min_{tech}} \left[ \frac{kg \ de \ CO_2}{ano} \right] = \left| M_{CO_2eqtechconst_{anual_{med}}} \left[ \frac{kg \ de \ CO_2}{ano} \right] - MIN \left( M_{CO_2eqtechconst_{anual_i}} \right) \left[ \frac{kg \ de \ CO_2}{ano} \right] \right| \quad [2.35]$$

$$Erro_{max_{tech}} \left[ \frac{kg \ de \ CO_2}{ano} \right] = \left| M_{CO_2eqtechconst_{anual_{med}}} \left[ \frac{kg \ de \ CO_2}{ano} \right] - MAX \left( M_{CO_2eqtechconst_{anual_i}} \right) \left[ \frac{kg \ de \ CO_2}{ano} \right] \right| \quad [2.36]$$

### 2.2.4 Fatores de emissão

Nesta dissertação, foi determinado como objetivo principal, o cálculo de dois fatores de emissão distintos. O primeiro, intitulado de fator de emissão direta, corresponde apenas às emissões diretas provenientes da queima dos principais combustíveis fósseis utilizados para produção de energia elétrica e o seu valor anual e médio para o período em estudo pode ser calculado por:

$$FE_{direto_{tech_{k,med}}} \left[ \frac{g \text{ de } CO_2}{kWh} \right] = \frac{M_{CO_2eq_{tech_{operdir_{comb\_prim_{k,med}}}}} \left[ \frac{g \text{ de } CO_2}{ano} \right]}{\frac{E_{tech_{total_{k,med}}}}{1} \left[ \frac{kWh}{ano} \right]} \quad [2.37]$$

Tal como referido anteriormente, este fator de emissão apenas contem emissão associadas a combustíveis fósseis, ou seja, para ambos os tipos de centrais hidroelétricas, para as centrais eólicas, e solar fotovoltaicas, o valor deste é equivalente a 0  $g \text{ de } CO_2/kWh$ .

O segundo fator de emissão calculado é intitulado de fator de emissão total e contem todas as emissões estudadas nesta dissertação. Os valores anuais e médio deste fator são dados por:

$$FE_{total_{tech_{k,med}}} \left[ \frac{g \text{ de } CO_2}{kWh} \right] = \frac{M_{CO_2eq_{tech_{total_{k,med}}}}} \left[ \frac{g \text{ de } CO_2}{ano} \right]}{\frac{E_{tech_{total_{k,med}}}}{1} \left[ \frac{kWh}{ano} \right]} \quad [2.38]$$

## 2.3 Área geográfica

### 2.3.1 Área ocupada

As áreas ocupadas pelas diversas centrais em estudos foram vetorizadas em programa SIG a partir de mapas projetados e imagens de satélite disponibilizadas por OSM e Google. Todas as áreas foram consideradas constantes ao longo dos anos estudados sendo que apenas a introdução de novas centrais, iria alterar a área ocupada por uma dada tecnologia. Após a obtenção destes valores individuais nos diferentes anos estudados, foi possível calcular a área geográfica total ocupada anualmente por cada tecnologia e os seus valores médios para o período de quatro anos estudados a partir das equações:

$$A_{tech_k} [km^2] = \sum (A_{tech_{central_k}}) [km^2] \quad [2.39]$$

$$A_{tech_{med}} [km^2] = Média(A_{tech_k}) [km^2] \quad [2.40]$$

Dado que os valores de área ocupada individuais foram obtidos a partir de mapas com um determinado erro associado e a própria vetorização acrescentou, também, um determinado erro, foi necessário comparar os valores obtidos a valores na literatura de modo a determinar o erro total existente no cálculo da área ocupada. Foram utilizados três métodos distintos dependendo dos dados disponíveis ao público.

Para as centrais hidroelétricas com albufeira de reserva, foi possível obter polígonos correspondentes à área ocupada pela maior parte das albufeiras consideradas nesta dissertação, disponibilizados pela APA. Primeiramente, foi considerado se a percentagem de área ocupada possível de comparar correspondia a um valor percentual da área total ocupada por este tipo de tecnologia.

$$Percentagem_{A_{HE} albufeira_{comp_k}} [\%] = \frac{A_{tech_{comp_k}} [km^2]}{A_{tech_k} [km^2]} \times 100 [\%] \quad [2.41]$$

Obtida a informação que este valor percentual era elevado, foram apenas comparadas as áreas ocupadas pelas albufeiras com polígonos vetorizados pela APA, sendo o erro obtido, posteriormente, propagado para toda a área ocupada calculada nesta dissertação.

$$Erro_{A_{HE} albufeira_k} [\%] = \frac{A_{tech_{comp_k}} [km^2]}{A_{tech_{APA_k}} [km^2]} \times 100 [\%] \quad [2.42]$$

Para as centrais termoelétricas a carvão e a gás natural, foram obtidos, através das declarações ambientais da EDP e de documentos AIA, valores correspondentes à área ocupada por cada central em estudo, permitindo, assim, a análise do erro existente em toda a área ocupada por ambos os tipos de tecnologia.

$$Erro_{A_{TE} \text{ carvão}, TE \text{ gn}_k} [\%] = \frac{A_{tech_k} [km^2]}{A_{tech_{lit}_k} [km^2]} \times 100 [\%] \quad [2.43]$$

Por fim, para os restantes tipos de central, não foram encontrados valores reais associados às centrais em estudo, sendo necessário obter valores teóricos dependentes da potência instalada ou energia produzida pelo tipo de tecnologia. Esta análise apenas pode conferir se os valores obtidos são realistas analisando a sua variação de um valor teórico ou a sua posição entre uma banda de valores, não sendo possível apontar um valor correto para a área ocupada por estes três tipos de centrais em Portugal continental. Para estes tipos de centrais foram, também, analisadas as razões da existência de erro na obtenção do valor de área ocupada.

Conhecendo os valores de área geográfica ocupada por cada tipo de tecnologia em estudo, foi possível calcular a percentagem ocupacional destas no território de Portugal continental para cada ano e o valor médio associado ao período estudado a partir das expressões [2.44] e [2.45].

$$Ocupação \text{ do país}_k [\%] = \frac{A_{tech_k} [km^2]}{A_{PT\_cont} [km^2]} \times 100 [\%] \quad [2.44]$$

$$Ocupação \text{ do país}_{med} [\%] = Média(Ocupação \text{ do país}_k) [\%] \quad [2.45]$$

### 2.3.2 Análise de resultados

Como objetivo desta dissertação, foram estudadas as razões entre a área ocupada e a potência instalada, e a área ocupada e energia produzida por cada uma das tecnologias ao longo dos anos estudados. Para o cálculo destes conjuntos de valores bem como o valor médio associado a cada razão, foram utilizadas as seguintes equações.

$$\left( \frac{A_{tech}}{P_{tech}} \right)_k \left[ \frac{m^2}{kW} \right] = \frac{A_{tech_k} [m^2]}{P_{tech_k} [kW]} \quad [2.46]$$

$$\left( \frac{A_{tech}}{E_{tech_{total}}} \right)_k \left[ \frac{m^2}{kWh} \right] = \frac{A_{tech_k} [m^2]}{E_{tech_{total}_k} [kWh]} \quad [2.47]$$

$$\left( \frac{A_{tech}}{P_{tech}} \right)_{med} \left[ \frac{m^2}{kW} \right] = Média \left( \left( \frac{A_{tech}}{P_{tech}} \right)_k \right) \left[ \frac{m^2}{kW} \right] \quad [2.48]$$

$$\left( \frac{A_{tech}}{E_{tech_{total}}} \right)_{med} \left[ \frac{m^2}{kWh} \right] = Média \left( \left( \frac{A_{tech}}{E_{tech_{total}}} \right)_k \right) \left[ \frac{m^2}{kWh} \right] \quad [2.49]$$

## 2.4 Resultados relativos a Portugal continental

### 2.4.1 Emissões de gases com efeito de estufa

Nos subcapítulos anteriores foram analisadas as emissões indiretas, diretas e totais associadas às fases de construção e operação de cada uma das tecnologias estudadas. Neste subcapítulo, foram calculados os restantes valores necessário para melhor poder comparar os impactos que cada uma possui e analisar a situação presente em Portugal continental. Primeiramente, foram calculadas as emissões totais provenientes da produção de eletricidade presentes em Portugal continental, em cada um dos quatro anos e o seu valor médio a partir das duas expressões seguintes.

$$M_{CO_{2eqPT\_conttotal}_k} \left[ \frac{kg \ CO_{2eq}}{ano} \right] = \sum_{tech} \left( M_{CO_{2eqtech_{total}_k}} \right) \left[ \frac{kg \ CO_{2eq}}{ano} \right] \quad [2.50]$$

$$M_{CO_{2eqPT\_conttotal}_{med}} \left[ \frac{kg \ CO_{2eq}}{ano} \right] = \sum \left( M_{CO_{2eqtech_{total}_{med}}} \right) \left[ \frac{kg \ CO_{2eq}}{ano} \right] \quad [2.51]$$

### 2.4.2 Fatores de emissão

Conhecendo os valores individuais para cada um dos fatores de emissão calculados nesta dissertação, após estes serem comparados com valores disponíveis na literatura de modo a verificar se os valores obtidos são realistas, foi possível calcular os fatores de emissão direta e total associados ao mix de produção elétrica de Portugal para cada um dos anos e, também, o seu valor médio a partir das equações seguintes:

$$FE_{direto_{mix\ elétrico}_k} \left[ \frac{g\ de\ CO_2}{kWh} \right] = \sum \left( FE_{direto_{tech}_k} \left[ \frac{g\ de\ CO_2}{kWh} \right] \times E_{tech\%_{mix}_k} [\%] \right) \quad [2.52]$$

$$FE_{total_{mix\ elétrico}_k} \left[ \frac{g\ de\ CO_2}{kWh} \right] = \sum \left( FE_{total_{tech}_k} \left[ \frac{g\ de\ CO_2}{kWh} \right] \times E_{tech\%_{mix}_k} [\%] \right) \quad [2.53]$$

$$FE_{direto_{mix\ elétrico}_{med}} \left[ \frac{g\ de\ CO_2}{kWh} \right] = Média \left( FE_{direto_{mix\ elétrico}_k} \right) \left[ \frac{g\ de\ CO_2}{kWh} \right] \quad [2.54]$$

$$FE_{total_{mix\ elétrico}_{med}} \left[ \frac{g\ de\ CO_2}{kWh} \right] = Média \left( FE_{total_{mix\ elétrico}_k} \right) \left[ \frac{g\ de\ CO_2}{kWh} \right] \quad [2.55]$$

### 2.4.3 Área ocupada

Com o conjunto de valores de área ocupada anualmente por cada uma das tecnologias existentes em Portugal continental, foi possível obter os valores correspondentes a toda a área ocupada em Portugal continental para a produção de energia elétrica em cada um dos anos estudados e o valor médio destas áreas.

$$A_{eletricidade_k} [km^2] = \sum (A_{tech_k}) [km^2] \quad [2.56]$$

$$A_{eletricidade_{med}} [km^2] = Média (A_{energia_k}) [km^2] \quad [2.57]$$

Por fim, foi calculada a percentagem média de ocupação de cada uma das tecnologias estudadas nesta dissertação.

$$Imp_{A_{tech\%_{eletricidade}_{med}}} [\%] = \frac{A_{tech_{med}} \left[ \frac{kg\ de\ CO_2}{ano} \right]}{A_{eletricidade_{med}} \left[ \frac{kg\ de\ CO_2}{ano} \right]} \times 100 [\%] \quad [2.58]$$

### 3. Produção de eletricidade

Nesta dissertação foi estudado um total de 528 centrais em funcionamento em Portugal continental entre os anos 2015 e 2018. A listagem destas centrais foi compilada a partir da base de dados do estudo e2p<sup>[R.5]</sup>, da INEGI, para as centrais associadas a fontes renováveis de energia, e o centro de informações da REN<sup>[R.6]</sup> e a lista de centrais da EDP<sup>[R.13], [R.14], [R.15], [R.16]</sup>, para as centrais associadas a fontes energéticas provenientes de combustíveis fósseis, sendo que foram apenas contabilizadas as centrais em Portugal continental ativas no período de estudo e foi, também, considerado que estas produzem o total da energia elétrica produzida em Portugal continental. A lista completa das centrais estudadas nesta dissertação está mapeada na Figura 3.1, apresentada à direita. De modo a estudar os valores de eletricidade produzida, de emissões, e de área ocupada numa base anual, foi necessário estabelecer o ano de construção e de início de produção de eletricidade para cada central. Para termos de simplificação foi estabelecido que ambos os anos referidos anteriormente seriam os mesmos e que o início de produção de energia elétrica dava-se no dia 1 de janeiro de modo a que fossem ignorados os meses em que, na realidade, a central ainda não

produzia eletricidade. Como exemplo, uma central construída no mês de julho de 2016 foi considerada como uma central que produziu energia elétrica em todo o ano de 2016 e que completou a sua construção também no mesmo ano, o que leva a que as emissões referentes à sua construção sejam também ajustadas para 2016, quando necessário, como é o caso da eletricidade consumida nessa fase. No intervalo de tempo em estudo houve uma evolução do número de centrais pois parte delas foi construída após o início do período estudado. Destes 528 pontos de produção de energia elétrica, 497 começaram a produzir antes de ou em 2015 enquanto em 2016, 2017 e 2018 foram construídas 9, 9 e 13 centrais, respetivamente.

Em termos de energia elétrica produzida foram utilizados os valores de produção do centro de informação da REN<sup>[R.6]</sup>, sendo assumido que os valores acumulados para dezembro de um dado ano em estudo representavam o total produzido em Portugal continental nesse mesmo ano. Embora a repartição desta energia seja abordada nos subcapítulos seguintes, é apresentada a Tabela 3.1, que representa a variação do número total de centrais e da energia elétrica produzida ao longo do período em estudo.

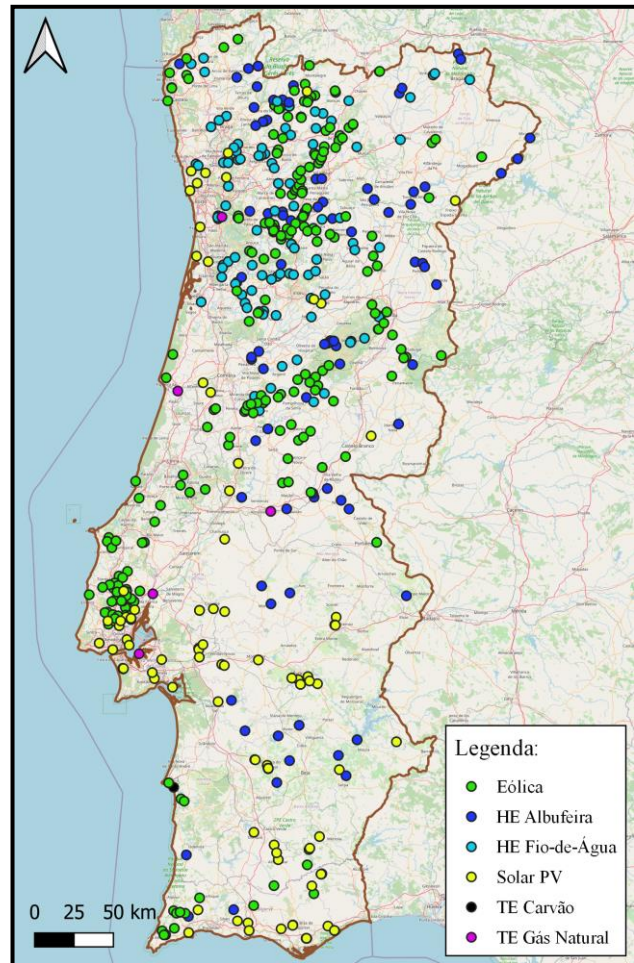


Figura 3.1: Mapa das centrais existentes em Portugal continental entre os anos de 2015 e 2018. (Dados provenientes do projeto e2p<sup>[R.5]</sup>).

Tabela 3.1: Evolução do número de centrais estudadas, potência instalada, e energia elétrica produzida em Portugal continental ao longo do período de tempo em estudo.

|                                  | Ano   |       |       |       |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                                  | 2015  | 2016  | 2017  | 2018  |
| Número de centrais estudadas     | 497   | 506   | 515   | 528   |
| Potência instalada (GW)          | 16,90 | 17,46 | 18,51 | 18,64 |
| Energia elétrica produzida (TWh) | 48,17 | 55,88 | 54,55 | 55,15 |

### 3.1 Fontes de energia não renováveis

Parte da eletricidade produzida em Portugal no espaço de tempo estudado foi proveniente de centrais com fontes de energia não renováveis, nomeadamente as centrais termoelétricas a carvão e a gás natural. Na Tabela 3.2, apresentada abaixo, estão representados os valores de energia elétrica produzida por estas ao longo dos anos em estudo.

Tabela 3.2: Valores anuais de energia elétrica produzida por centrais termoelétricas a carvão e gás natural em Portugal continental entre 2015 e 2018, inclusive, obtidos a partir do centro de informação da REN <sup>[R.6]</sup>.

| Ano  | Tecnologia       |         |               | Energia elétrica (GWh) |
|------|------------------|---------|---------------|------------------------|
| 2015 | Regime ordinário | Térmica | Sines         | 9657                   |
|      |                  |         | Ribatejo      | 748                    |
|      |                  |         | Lares         | 1836                   |
|      |                  |         | Pego CC       | 596                    |
|      |                  |         | Pego          | 4021                   |
|      |                  |         | T. Outeiro CC | 2062                   |
|      | Regime especial  | Térmica |               | 7540                   |
| 2016 | Regime ordinário | Térmica | Sines         | 8082                   |
|      |                  |         | Ribatejo      | 1648                   |
|      |                  |         | Lares         | 1954                   |
|      |                  |         | Pego CC       | 1131                   |
|      |                  |         | Pego          | 3616                   |
|      |                  |         | T. Outeiro CC | 2641                   |
|      | Regime especial  | Térmica |               | 7203                   |
| 2017 | Regime ordinário | Térmica | Sines         | 9426                   |
|      |                  |         | Ribatejo      | 2559                   |
|      |                  |         | Lares         | 3382                   |
|      |                  |         | Pego CC       | 3635                   |
|      |                  |         | Pego          | 4182                   |
|      |                  |         | T. Outeiro CC | 3902                   |
|      | Regime especial  | Térmica |               | 7293                   |
| 2018 | Regime ordinário | Térmica | Sines         | 8067                   |
|      |                  |         | Ribatejo      | 2346                   |
|      |                  |         | Lares         | 1745                   |
|      |                  |         | Pego CC       | 2035                   |
|      |                  |         | Pego          | 3050                   |
|      |                  |         | T. Outeiro CC | 4007                   |
|      | Regime especial  | Térmica |               | 7355                   |

### 3.2 Fontes de energia renováveis

O resto da eletricidade produzida em Portugal continental teve origem em centrais com fontes de energia renováveis, nomeadamente de fonte hídrica, eólica e solar fotovoltaica. Os valores na Tabela 3.3, apresentada abaixo, representam a energia elétrica produzida em cada um destes tipos de centrais.

*Tabela 3.3: Valores anuais de energia elétrica produzida por centrais hidroelétricas a fio de água e com albufeira de reserva, eólicas, e solar fotovoltaicas em Portugal continental entre 2015 e 2018, inclusive, obtidos a partir do centro de informação da REN [R.6].*

| Ano  | Tecnologia       |                    |             | Energia elétrica (GWh) |
|------|------------------|--------------------|-------------|------------------------|
| 2015 | Regime ordinário | Hídrica            | Fio de água | 5365                   |
|      |                  |                    | Albufeira   | 3432                   |
|      | Regime especial  | Hídrica            |             | 816                    |
|      |                  | Eólica             |             | 11334                  |
|      |                  | Solar Fotovoltaica |             | 760                    |
| 2016 | Regime ordinário | Hídrica            | Fio de água | 8160                   |
|      |                  |                    | Albufeira   | 7137                   |
|      | Regime especial  | Hídrica            |             | 1332                   |
|      |                  | Eólica             |             | 12188                  |
|      |                  | Solar Fotovoltaica |             | 786                    |
| 2017 | Regime ordinário | Hídrica            | Fio de água | 2805                   |
|      |                  |                    | Albufeira   | 3921                   |
|      | Regime especial  | Hídrica            |             | 614                    |
|      |                  | Eólica             |             | 11973                  |
|      |                  | Solar Fotovoltaica |             | 853                    |
| 2018 | Regime ordinário | Hídrica            | Fio de água | 6211                   |
|      |                  |                    | Albufeira   | 6056                   |
|      | Regime especial  | Hídrica            |             | 1093                   |
|      |                  | Eólica             |             | 12351                  |
|      |                  | Solar Fotovoltaica |             | 829                    |

### 3.3 Mix elétrico em Portugal continental

Por fim, tendo em conta os valores obtidos nas tabelas anteriores e o tratamento de dados explicado no capítulo relativo à metodologia, foi possível calcular o valor total de eletricidade presente no *mix* de geração de energia elétrica de Portugal continental, e os valores médios relativos a cada tecnologia estudada e ao *mix* de geração de energia elétrica total no período em estudo. Para além destes, também são apresentadas as percentagens referentes a cada uma destas tecnologias no *mix* de geração de energia elétrica de Portugal continental e os seus valores médios.

Tabela 3.4: Síntese dos valores anuais de energia elétrica produzida em Portugal continental entre 2015 e 2018, inclusive, obtidos a partir do centro de informação da REN<sup>[R.6]</sup>, subdivididos por tipo de tecnologia utilizado e as respectivas percentagens dessa subdivisão.

| Ano   | Tecnologia            | Energia elétrica (TWh) | Percentagem do total (%) |
|-------|-----------------------|------------------------|--------------------------|
| 2015  | Hídrica (Albufeira)   | 9,34                   | 19,39                    |
|       | Hídrica (Fio de água) | 0,27                   | 0,57                     |
|       | Térmica (Carvão)      | 16,09                  | 33,40                    |
|       | Térmica (GN)          | 10,37                  | 21,53                    |
|       | Eólica                | 11,33                  | 23,53                    |
|       | Fotovoltaica          | 0,76                   | 1,58                     |
|       | Total                 | 48,17                  | 100                      |
| 2016  | Hídrica (Albufeira)   | 15,97                  | 28,59                    |
|       | Hídrica (Fio de água) | 0,65                   | 1,17                     |
|       | Térmica (Carvão)      | 13,97                  | 25,00                    |
|       | Térmica (GN)          | 12,30                  | 22,02                    |
|       | Eólica                | 12,19                  | 21,81                    |
|       | Fotovoltaica          | 0,79                   | 1,41                     |
|       | Total                 | 55,88                  | 100                      |
| 2017  | Hídrica (Albufeira)   | 7,12                   | 13,05                    |
|       | Hídrica (Fio de água) | 0,22                   | 0,41                     |
|       | Térmica (Carvão)      | 15,94                  | 29,22                    |
|       | Térmica (GN)          | 18,44                  | 33,81                    |
|       | Eólica                | 11,97                  | 21,95                    |
|       | Fotovoltaica          | 0,85                   | 1,56                     |
|       | Total                 | 54,55                  | 100                      |
| 2018  | Hídrica (Albufeira)   | 13,15                  | 23,84                    |
|       | Hídrica (Fio de água) | 0,21                   | 0,39                     |
|       | Térmica (Carvão)      | 13,42                  | 24,34                    |
|       | Térmica (GN)          | 15,18                  | 27,53                    |
|       | Eólica                | 12,35                  | 22,40                    |
|       | Fotovoltaica          | 0,83                   | 1,50                     |
|       | Total                 | 55,15                  | 100                      |
| Média | Hídrica (Albufeira)   | 11,39                  | 21,32                    |
|       | Hídrica (Fio de água) | 0,34                   | 0,64                     |
|       | Térmica (Carvão)      | 14,86                  | 27,80                    |
|       | Térmica (GN)          | 14,07                  | 26,34                    |
|       | Eólica                | 11,96                  | 22,39                    |
|       | Fotovoltaica          | 0,81                   | 1,51                     |
|       | Total                 | 53,43                  | 100                      |

Analisando a Tabela 3.4, é observável que o *mix* de geração de energia elétrica de Portugal continental é altamente dependente da produção de eletricidade a partir de combustíveis fósseis. Estas representam,



em média, mais de 50% da energia produzida. Tanto as centrais hidroelétricas com albufeira como as a fio de água replicam as variações dos níveis de precipitação anual, sendo conhecida a alta correlação entre os dois valores em ambas as tecnologias <sup>[R.22], [R.23]</sup>. Normalmente, em Portugal continental, existe um ciclo de variação anual entre anos secos e anos húmidos. Esta variação combinada com o facto das centrais à base da energia eólica e solar fotovoltaica possuírem um baixo nível de armazenamento, impedindo o seu uso quando as suas respetivas fontes de energia não apresentam condições favoráveis, origina um aumento da necessidade de produção de energia por centrais termoelétricas.

Nos capítulos seguintes serão apresentadas tabelas referentes às percentagens de energia elétrica conhecida e assumida estudadas nesta dissertação para cada tipo de central em comparação com a eletricidade total produzida em Portugal sendo que um valor elevado da percentagem de energia conhecida contribui para um valor mais fidedigno das emissões associadas ao tipo de central embora com os valores assumidos, deverá existir um equilíbrio entre os valores sobrestimados e os subestimados.

## 4. Centrais hidroelétricas com albufeira

As centrais hidroelétricas com albufeira de reserva correspondem a 92 das 528 centrais estudadas. Em média, estas centrais produzem 11,39 TWh de eletricidade anualmente, o que corresponde a 21,32% do total da energia elétrica média anual, produzida em Portugal continental, entre 2015 e 2018. Deste valor de energia, 88,58% tem origem conhecida, que pode ser traçada às declarações ambientais da EDP [R.7],[R.8],[R.9],[R.10],[R.11],[R.12], e, em média, a fonte de 11,42% da energia foi assumida. Ao longo do período de tempo em estudo houve alteração do valor de potência instalada pois parte das centrais em estudo foram construídas depois de 2015, tendo 2 sido construídas em 2016, e mais 2 construídas em 2017.

Na Figura 4.1, apresentada à direita, estão representadas as centrais hidroelétricas com albufeira, em funcionamento entre 2015 e 2018, estudadas sobrepostas sobre o mapa de Portugal continental. Na Tabela 4.1, apresentada abaixo, está representada a variação do número de centrais hidroelétricas com albufeira estudadas, a energia elétrica total produzida anualmente por todas as centrais deste tipo, que representa, também, o total de eletricidade produzida em Portugal continental, e as percentagens de energia com fonte conhecida e de fonte assumida, para cada um dos anos estudados.

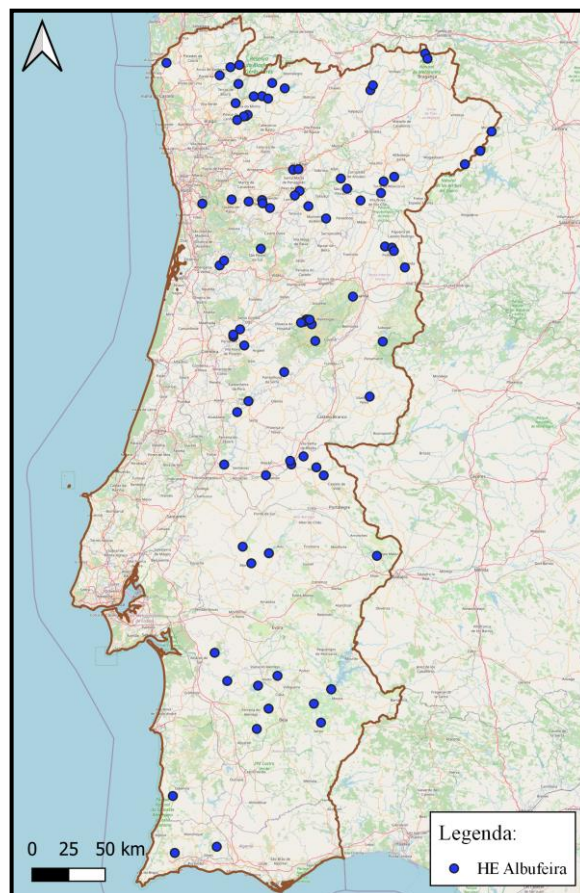


Figura 4.1: Mapa das centrais hidroelétricas com albufeira de reserva estudadas em Portugal continental entre os anos de 2015 e 2018, inclusive. (Dados provenientes do projeto e2p<sup>[R.5]</sup>).

Tabela 4.1: Evolução do número de centrais, potência instalada e energia elétrica produzida no conjunto de centrais hidroelétricas com albufeira de reserva estudadas em Portugal continental entre 2015 e 2018, inclusive, bem como as percentagens da energia elétrica total produzida com fonte conhecida e com fonte assumida.

|                                  | Ano     |         |         |         |
|----------------------------------|---------|---------|---------|---------|
|                                  | 2015    | 2016    | 2017    | 2018    |
| Número de centrais estudadas     | 88      | 90      | 92      | 92      |
| Potência instalada (MW)          | 5512,69 | 5886,39 | 6928,69 | 6928,69 |
| Energia elétrica produzida (TWh) | 9,34    | 15,97   | 7,12    | 13,14   |
| Percentagem conhecida (%)        | 95,47   | 90,82   | 79,14   | 88,90   |
| Percentagem assumida (%)         | 4,53    | 9,18    | 20,86   | 11,10   |

#### 4.1 Emissões na fase de construção

Para o cálculo das emissões na fase de construção para centrais hidroelétricas com albufeira de reserva foram utilizados 3 estudos diferentes, referentes a centrais localizadas na Suíça e na China. As Tabelas 4.2, Tabela 4.3, e Tabela 4.4, apresentadas abaixo, contêm os valores utilizados na construção de cada uma das centrais referidas nos estudos. Devido à diferença nos valores de potência instaladas nessas centrais, os valores apresentados nas tabelas foram ajustados para valores de quantidade de massa de material ou energia necessária para um MW de potência instalada. No caso do concreto foi sempre considerada a mesma mistura dividida em percentagens do peso total onde 84,9%, 5,4% e 9,8% correspondem a cascalho, água e cimento, respetivamente.

*Tabela 4.2: Listagem de emissões relacionadas com a construção de uma central na China com potência nominal de 44 MW e tempo de vida de 50 anos tal como descrito no projeto A do estudo da Hydratek [R.24].*

| Material                           | Quantidade<br>( $kg\ CO_{2eq}/MW$ ) |
|------------------------------------|-------------------------------------|
| Materiais de construção principais | 9,18E+05                            |
| Equipamento e maquinaria           | 3,07E+05                            |
| Metais estruturais e dispositivos  | 1,07E+05                            |
| Gasóleo                            | 3,86E+05                            |
| Eletricidade                       | 8,77E+05                            |

*Tabela 4.3: Listagem de emissões relacionadas com a construção de uma central na China com potência nominal de 3600 MW e tempo de vida de 100 anos tal como descrito no projeto B do estudo da Hydratek [R.24].*

| Material                           | Quantidade<br>( $kg\ CO_{2eq}/MW$ ) |
|------------------------------------|-------------------------------------|
| Materiais de construção principais | 4,75E+05                            |
| Equipamento e maquinaria           | 1,87E+05                            |
| Metais estruturais e dispositivos  | 3,33E+04                            |
| Gasóleo                            | 1,19E+05                            |
| Eletricidade                       | 2,20E+05                            |

*Tabela 4.4: Listagem de material utilizado para construção de uma central hidroelétrica com albufeira de reserva na Suíça com potência nominal de 95 MW e tempo de vida de 150 anos, tal como descrito no estudo sobre inventários do ciclo de vida de centrais hidroelétricas encomendado pelo Öko-Institute [R.25].*

| Material          | Quantidade<br>( $kg/MW$ ) | Quantidade<br>( $MWh/MW$ ) |
|-------------------|---------------------------|----------------------------|
| Cimento           | 1,07E+06                  | -                          |
| Cascalho          | 9,36E+06                  | -                          |
| Água              | 5,95E+05                  | -                          |
| Concreto          | 1,10E+07                  | -                          |
| Aço reforçado     | 1,83E+04                  | -                          |
| Aço cromado       | 1,92E+04                  | -                          |
| Aço de baixa liga | 4,28E+04                  | -                          |
| Cobre             | 3,12E+03                  | -                          |
| Eletricidade      | -                         | 2,87E+02                   |
| Gasóleo           | -                         | 1,75E+02                   |

Conhecendo os materiais utilizados na construção deste tipo de centrais, utilizando os cálculos relatados no capítulo anterior, foram obtidos os valores médios anuais associados às emissões de gases com efeito

de estufa libertados na fase de construção. Estes valores foram, posteriormente, agrupados a média ao valor das emissões na fase de operação para cada ano em estudo de modo a analisar o verdadeiro impacto ambiental que este tipo de central tem anualmente, sendo que estes resultados serão apresentados posteriormente.

Numa análise percentual do impacto de cada material na fase de construção deste tipo de central, foi utilizado o valor médio dos totais anuais, obtidos, para esta fase, e o estudo com o maior número de materiais utilizados, o estudo apresentado na Tabela 4.4. Os valores percentuais do impacto de cada material no valor total desse estudo estão apresentados abaixo na Figura 4.2. É possível aplicar esta divisão por impacto de cada material na fase de construção ao valor médio dos valores totais dos 3 estudos realizados nesta dissertação, obtendo, assim, o valor de emissões de gases com efeito de estufa libertados em Portugal continente para cada um dos materiais utilizados nesta fase do tempo de vida das centrais hidroelétricas com albufeira de reserva. A partir da média dos totais de cada estudo, foi obtido um valor, considerado o mais realista, equivalente a  $2 \times 10^5 \text{ t CO}_{2eq}/ano$ .

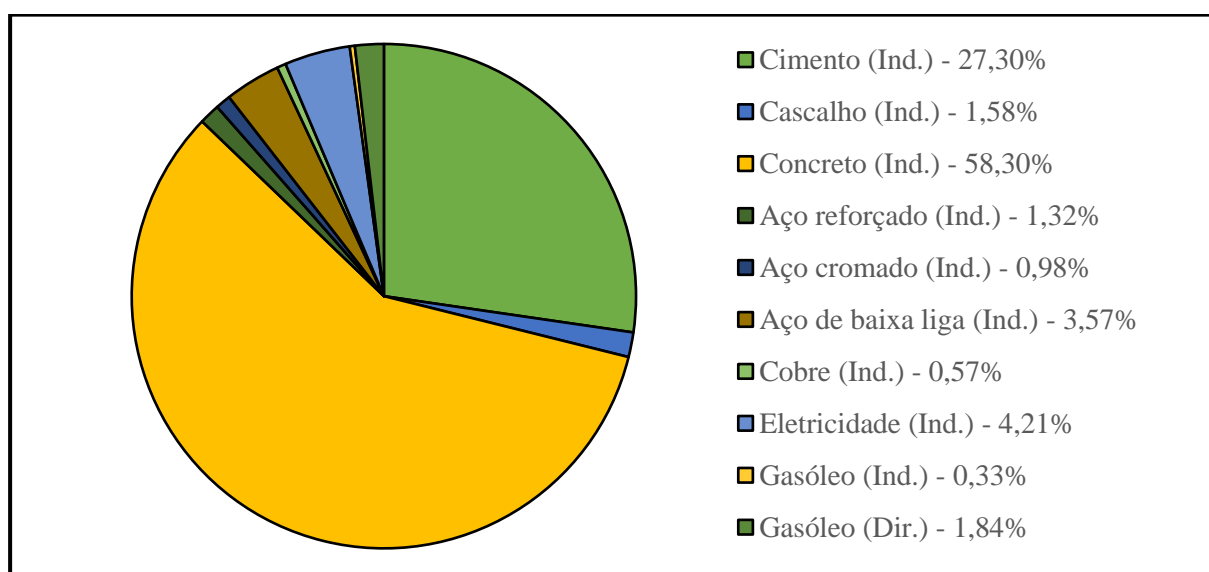


Figura 4.2: Divisão das diversas fontes de emissão na fase de construção de uma central hidroelétrica com albufeira de reserva.

Grande parte do projeto de construção deste tipo de central é a construção de uma barragem de modo a conseguir conservar a albufeira de reserva. Assim, é natural observar na figura que grande parte das emissões referentes a esta fase estejam atribuídas ao betão, que é utilizado na construção da barragem, visto ser este o seu principal componente. Para além do betão, também, o cimento ocupa uma parte importante das emissões totais da fase de construção porque este está relacionado com a produção do próprio betão, juntamente com o cascalho e a água. Apesar disso, apenas o cimento apresenta uma fatia importante pois este apresenta um maior fator de emissão para a sua produção em comparação com os outros dois ingredientes para a produção de betão, tal como apresentado na tabela do Anexo A.

## 4.2 Emissões na fase de operação

De modo a calcular as emissões na fase de operação deste tipo de central foram novamente utilizadas as declarações ambientais da EDP [R.7], [R.8], [R.9], [R.10], [R.11], [R.12], onde é possível retirar informação sobre os consumos operacionais de parte das centrais em estudo. Estes valores foram replicados para as centrais com consumos desconhecidos por meio de fatores de conversão baseados na relação consumo/energia elétrica produzida. A lista completa de consumos está apresentada na Tabela 4.5, com os fatores de conversão associados a cada consumo para cada ano, sendo importante referir que o combustível

utilizado para as viaturas que foi considerado nesta dissertação consiste num *mix* de partes iguais de gasóleo e gasolina.

Tabela 4.5: Lista de fatores de conversão utilizados, calculados a partir dos consumos analisados para as centrais hidroelétricas com albufeira presentes nas declarações ambientais da EDP [R.7], [R.8], [R.9], [R.10], [R.11], [R.12].

| Consumo                  | Fator de conversão (/GWh <sub>prod.</sub> ) |          |          |          |
|--------------------------|---|----------|----------|----------|
|                          | 2015  | 2016     | 2017     | 2018     |
| Eletricidade (GWh)       | 1,71E-01                                    | 8,87E-02 | 1,84E-01 | 1,01E-02 |
| SF <sub>6</sub> (kg)     | 2,80E-05                                    | 1,48E-03 | 1,89E-02 | 1,07E-03 |
| Combustível viaturas (L) | 2,70E+01                                    | 1,55E+01 | 4,89E+01 | 2,28E+01 |

Ao analisar a Tabela 4.5 é possível observar que existem 3 fontes de emissões de gases com efeito de estufa na fase de operação das centrais hidroelétricas com albufeira de reserva, a eletricidade obtida da rede pública, o SF<sub>6</sub>, e o combustível utilizado pelas viaturas. O SF<sub>6</sub> é um composto químico não só responsável por emissões indiretas, mas também responsável por emissões diretas quando existe uma fuga deste para a atmosfera, sendo o seu potencial de aquecimento global tabelado como equivalente a 23000 vezes a emissão da mesma massa de CO<sub>2</sub>, tal como referido no quinto relatório do IPCC para uma escala de 100 anos [R.26]. Tal como na fase de construção, estes consumos foram analisados em termos de emissões indiretas e diretas, sendo assim possível obter valores totais de emissão de gases com efeito de estufa na fase de operação. No caso das emissões diretas tanto o SF<sub>6</sub> como o *mix* de combustível possuem emissões.

Numa análise percentual do impacto de cada fonte de emissão nas emissões totais desta fase foram utilizadas as declarações ambientais anteriormente referidas, os valores médios anuais das emissões indiretas e diretas dos consumos analisados, e, também, a média dos valores totais das emissões provenientes da fase de operação no período entre 2015 e 2018. Pela equação [2.32] foi possível obter as percentagens referentes a estes impactos. O valor total médio de emissões de gases com efeito de estufa na fase de operação é de  $3 \times 10^5 \text{ t CO}_{2eq}/ano$  e a Figura 4.3, apresentada abaixo, corresponde à subdivisão deste valor pelas diversas fontes de emissões existentes nesta fase.

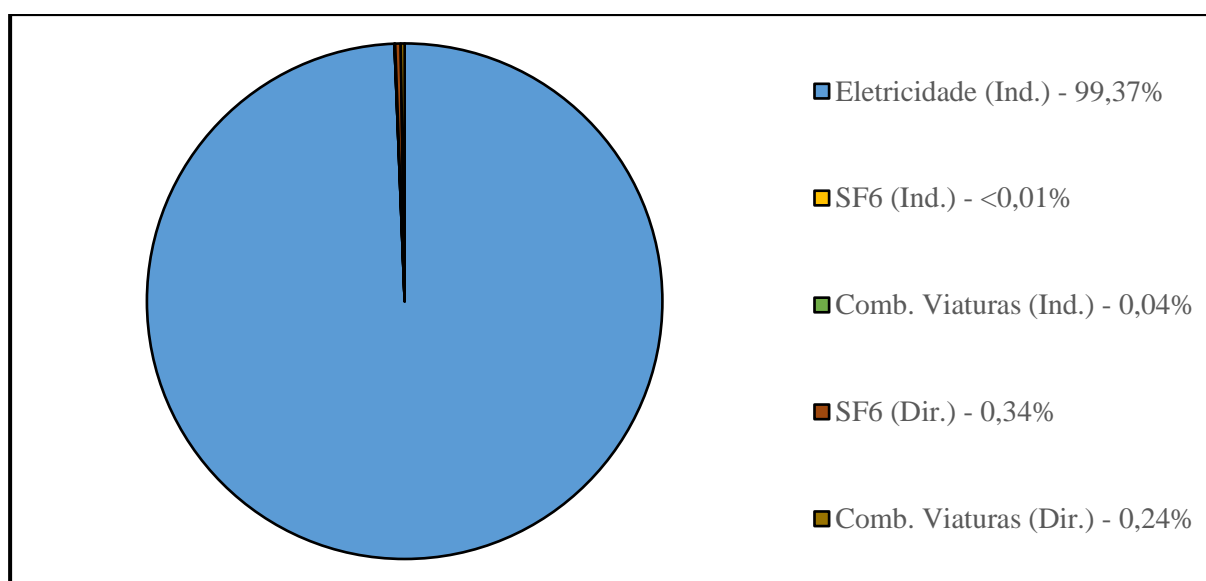


Figura 4.3: Divisão das diversas fontes de emissão na fase de operação de uma central hidroelétrica com albufeira de reserva.

Analisando a Figura 4.3 é possível observar que a eletricidade utilizada pelas centrais é a fonte de emissões diretas, sendo que todas as outras têm contribuições praticamente inexistentes. Estes valores de emissões causados pelo consumo de eletricidade estão relacionados com o *mix* de geração de energia elétrica existente em Portugal continental nos anos em estudo, logo, se este tipo de centrais estiverem integradas numa rede elétrica com baixa penetração de energia proveniente de centrais que utilizem combustíveis fósseis para produção de eletricidade, tanto o valor total como a percentagem de emissões relacionadas com a eletricidade utilizada será menor.

### 4.3 Análise do perfil de emissões anuais

Com base no valor total médio das emissões anuais na fase de construção obtido anteriormente e com o valor total anual de emissões na fase de operação para cada ano estudado é possível construir a Figura 4.4. Nesta figura é possível comparar não só a diferença de impacto entre as emissões em fase de construção e operação, mas também a variação do total de ambas ao longo do período em estudo. A barra de erro apresentada demonstra a variabilidade do valor das emissões totais na fase de construção entre o valor mínimo e máximo obtido a partir dos 3 estudos utilizados.

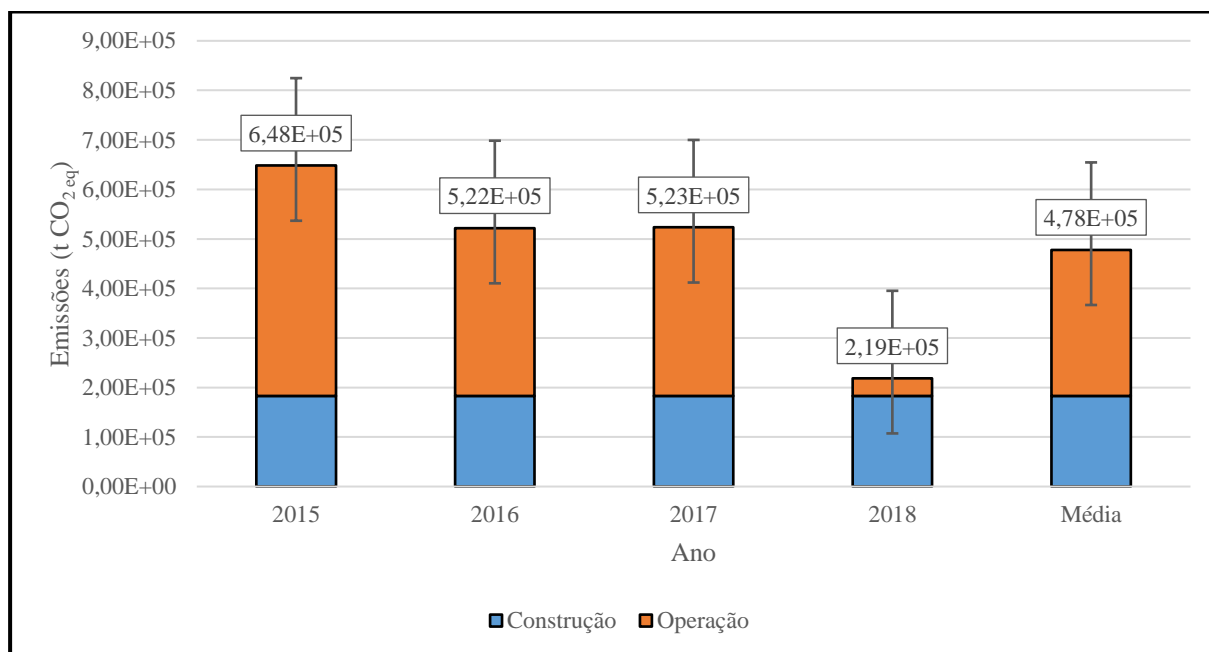


Figura 4.4: Gráfico da variação anual das emissões de gases com efeito de estufa nas fases de construção e operação, e, por sua vez, das emissões totais, referentes às centrais hidroelétricas com albufeira de reserva em funcionamento em Portugal continental entre 2015 e 2018, inclusive, e a média destes valores. No gráfico também encontra-se representado o erro presente nos cálculos referentes a estas centrais, efetuados nesta dissertação.

Na Figura 4.4 observa-se uma grande variabilidade entre os valores de emissão de gases com efeito de estufa na fase de operação. Este fenómeno é devido a dois fatores. Primeiramente, a alta variabilidade na produção de energia elétrica por este tipo de centrais que está por sua vez relacionada, como referido anteriormente, com a precipitação anual, entre outros fatores. Por outro lado, houve uma grande diminuição do valor de eletricidade consumo nalgumas centrais. Sendo a eletricidade consumida a maior fonte de emissões, é natural observar a grande discrepância entre os valores pré-2018 e 2018. Apesar de no ano de 2018, o perfil de emissões ser drasticamente diferente, no cômputo geral do estudo feito no período de tempo entre 2015 e 2018, o valor das emissões na fase de operação é superior ao valor das

emissões na fase de construção, sendo que, em termo de valores médio, as emissões da fase de operação ocupam 62% das emissões totais.

O facto de o valor de emissões na fase de operação ser superior ao valor da fase de construção é surpreendente pois era esperado que grande parte das emissões estivessem associadas à construção da barragem e central. Um fator que pode explicar esta diferença entre o esperado e o observado é que neste estudo não foi tido em conta a existência de centrais reversíveis, onde é utilizada eletricidade da rede pública de modo a recuperar o nível de água na albufeira de reserva sendo, no futuro, possível reutilizar a água da albufeira para produzir energia elétrica num período do dia mais pertinente. Estas utilizam sistemas de bombagem de alta eficiência, consumindo eletricidade durante horas de vazio, ou seja, horas onde não existe grande procura de eletricidade, possibilitando a produção rápida desta em horas de cheia e de ponta onde existe uma maior procura de eletricidade. Embora este seja um sistema com grandes vantagens em termos de equilíbrio entre os sistemas de produção de energia elétrica e a procura de eletricidade diária, visto que este estudo apresenta uma abordagem holística dos consumos anuais, este tipo de centrais acaba por ser penalizado.

#### 4.4 Fator de emissão

Com o conhecimento das emissões totais reais, obtidas pela junção das emissões totais da fase de construção e operação, foi obtido o fator de emissão de gases com efeito de estufa em função da energia elétrica produzida pelas centrais hidroelétricas com albufeira em Portugal continental não só para cada ano em estudo, mas também uma média destes valores.

*Tabela 4.6: Fator de emissão total médio calculado anualmente para centrais hidroelétricas com albufeira de reserva e a sua média de valores para o intervalo de tempo estudado.*

| Fator de emissão médio<br>( $g\ CO_{2eq}/kWh$ ) | Ano   |       |       |       |       |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
|   | 2015  | 2016  | 2017  | 2018  | Média |
| Total   | 69,41 | 32,67 | 73,53 | 16,64 | 41,95 |

Com a Tabela 4.6 foi, posteriormente, possível calcular o fator de emissão real do *mix* de geração de energia elétrica de Portugal continental. O valor deste fator e a comparação dos fatores de emissão dos vários tipos de central serão apresentados posteriormente no capítulo referente aos resultados totais.

#### 4.5 Área ocupada

Com base na lista de centrais devidamente georreferenciadas e com o auxílio dos Sistemas de Informação Geográfica, foram vetorizados polígonos representativos da área geográfica de cada central, sendo importante referir que no caso das centrais hidroelétricas com albufeira de reserva foram tidas em conta as estradas de acesso à central, a central em si, a barragem e albufeiras a nascente da central em questão. A Figura 4.5 apresenta um exemplo dos polígonos desenhados.



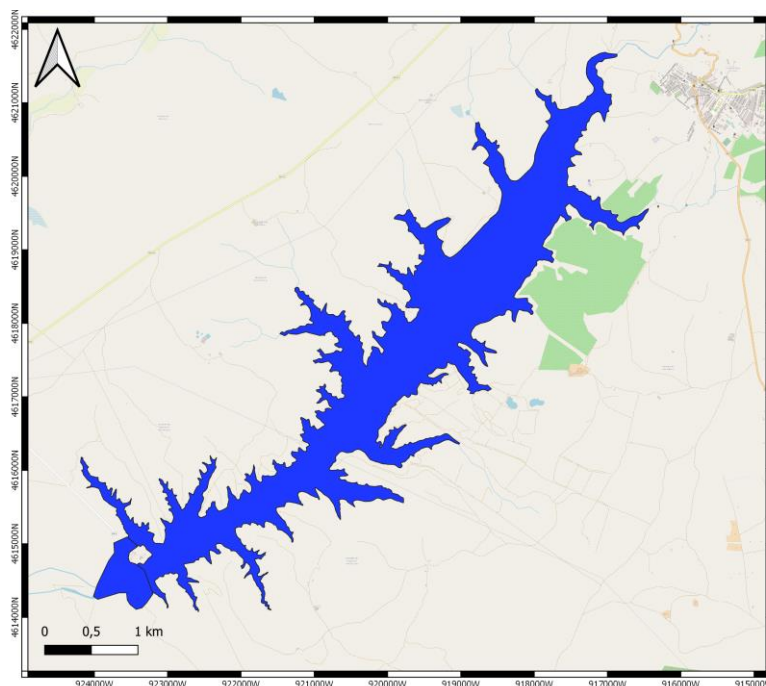


Figura 4.5: Exemplo de área de uma central hidroelétrica com albufeira de reserva mapeada. Neste exemplo é observável a área da central de Vale do Gaio e da albufeira adjacente, a albufeira de Vale do Gaio.

A partir dos polígonos vetorizados foi possível determinar o valor total de área ocupada por cada central. Neste estudo foi utilizada uma abordagem de divisão de área das albufeiras contabilizadas à nascente, ou seja, se uma albufeira estiver à nascente de uma série de centrais, essa tem um impacto na área não só na área ocupada pela central a que está associada, mas também na área ocupada por todas as centrais a jusante, sendo esta divisão feita a partir da potência instalada em cada central a jusante da albufeira. Esta abordagem leva a que as centrais a jusante tenham uma maior percentagem de área ocupada na albufeira, mas tendo em conta que parte dos sistemas hidroelétricos com várias centrais em sequência funcionam deste modo, esta abordagem foi utilizada para todas as centrais deste tipo. Juntamente com o ponto anterior, é de notar que o oposto não foi tido em conta, logo se uma central conduzir a água turbinada para outra albufeira, esta albufeira a jusante não foi contabilizada para a área ocupada da central. Este ponto é igualmente importante pois, como foi explicado anteriormente, foi assumida que nenhuma central possui um sistema hidroelétrico reversível. Por fim, é importante referir que as albufeiras de reserva têm outros usos como reservatórios para rega ou espaços para atividades lúdicas. Embora seja esse o caso em várias centrais em Portugal continental, sendo difícil determinar a percentagem de uma albufeira que deveria ser alocada para esses usos, foi sempre contabilizada a área total calculada como área utilizada para produção de eletricidade. A Tabela 4.7 demonstra a variação da área ocupada pelas centrais hidroelétricas com albufeira ao longo do período de tempo estudado e a correspondente percentagem da área de Portugal continental associada ao mesmo tipo de centrais.

Tabela 4.7: Evolução da área ocupada para produção de energia elétrica através de centrais hidroelétricas com albufeira durante o período de estudo, 2015 a 2018, inclusive, e a sua ocupação percentual da área de Portugal continental [R.27].

|                                     | Ano    |        |        |        |        |
|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                     | 2015   | 2016   | 2017   | 2018   | Média  |
| Área total (km <sup>2</sup> )       | 523,79 | 549,79 | 554,06 | 554,06 | 545,43 |
| Percentagem de ocupação do país (%) | 0,59   | 0,62   | 0,62   | 0,62   | 0,61   |



Tal como observado na tabela, existiu um ligeiro aumento na área ocupada pelas centrais hidroelétricas com albufeira de reserva ao longo do período de tempo em estudo equivalente a 6% da área geográfica total para este tipo de centrais em 2015. Apesar disso, a percentagem de ocupação do país é bastante baixa, não ultrapassando 1% da área de Portugal continental, sendo a área ocupada total no fim do período estudado equivalente a 77600 campos de futebol com dimensões de  $105 \times 68$  m.

#### 4.6 Erro associado à área ocupada

De modo a calcular o erro associado aos valores de área ocupada por cada central hidroelétrica com albufeira de reserva, foram utilizados polígonos vetorizados pela APA referentes às albufeiras de águas públicas. Estes polígonos não representam todas as albufeiras consideradas nesta dissertação e, assim, na Tabela 4.8 estão representados os valores de área comparáveis obtidos nesta dissertação, os valores disponibilizados pela APA, e o erro associado aos cálculos feitos nesta dissertação.

*Tabela 4.8: Evolução do erro associado à área ocupada para produção de eletricidade através de centrais hidroelétricas com albufeira entre 2015 e 2018, inclusive, e o seu valor médio.*

|  | Ano    |        |        |        |        |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|
|  | 2015   | 2016   | 2017   | 2018   | Média  |
| Área comparável (km <sup>2</sup> )                                 | 510,42 | 536,30 | 540,50 | 540,50 | 531,93 |
| Percentagem comparável da área total (%)                           | 97,45  | 97,55  | 97,55  | 97,55  | 97,52  |
| Área disponibilizada pela APA <sup>[R.57]</sup> (km <sup>2</sup> ) | 556,99 | 585,25 | 589,65 | 589,65 | 580,39 |
| Erro associado às áreas obtidas (%)                                | 8,36   | 8,37   | 8,34   | 8,34   | 8,35   |

Tendo em conta que a área analisada corresponde a mais de 97% da área obtida, é possível afirmar que esta permite uma análise suficiente da área calculada para este tipo de centrais. Com um erro percentual a rondar os 8%, a área total obtida aparenta ser uma aproximação razoável do valor real.

#### 4.7 Análise à área ocupada

O valor total da área ocupada por este tipo de centrais foi cruzado com os valores de potência instalada e de eletricidade produzida em cada ano de modo a obter informação sobre a utilização do espaço ocupado por estas centrais. A partir das equações [2.46] e [2.47] foram obtidos dois resultados distintos para a utilização da área para cada ano, sendo estes as razões área ocupada/potência instalada, e área ocupada/eletricidade produzida. As Figura 4.6 e Figura 4.7 são referentes às variações anuais destas duas razões ao longo do período em estudo. Em termos de valores médios para a área ocupada/potência instalada, e área ocupada/eletricidade produzida, foi obtido o valor  $86 \text{ m}^2/\text{kW}$  e  $5 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{kWh}$ , respetivamente.

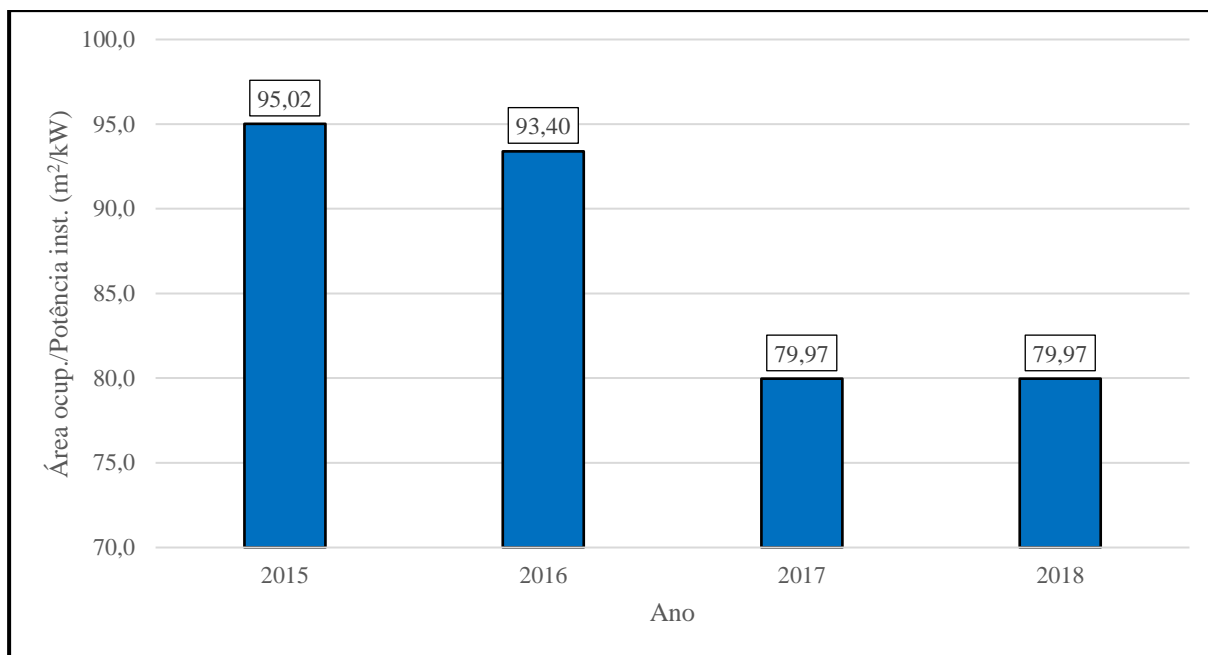


Figura 4.6: Gráfico da evolução anual da razão de área ocupada por potência instalada para centrais hidroelétricas com albufeira de reserva estudadas entre 2015 e 2018, inclusive.

Como é possível observar na Figura 4.6, existiu uma diminuição do valor da razão de  $95,02 m^2/kW$ , em 2015, para  $79,97 m^2/kW$ , em 2018, o que demonstra que, com a instalação de novas centrais no decorrer dos anos em estudo, houve uma melhor repartição do espaço total ocupado por este tipo de centrais para produção de energia elétrica, permitindo a instalação de uma maior potência por unidade de área. No capítulo dos resultados totais será comparada esta razão entre as diversas tecnologias e, de modo a compará-las ao longo de todo o período de tempo estudado, será utilizado o valor médio obtido, referido anteriormente.

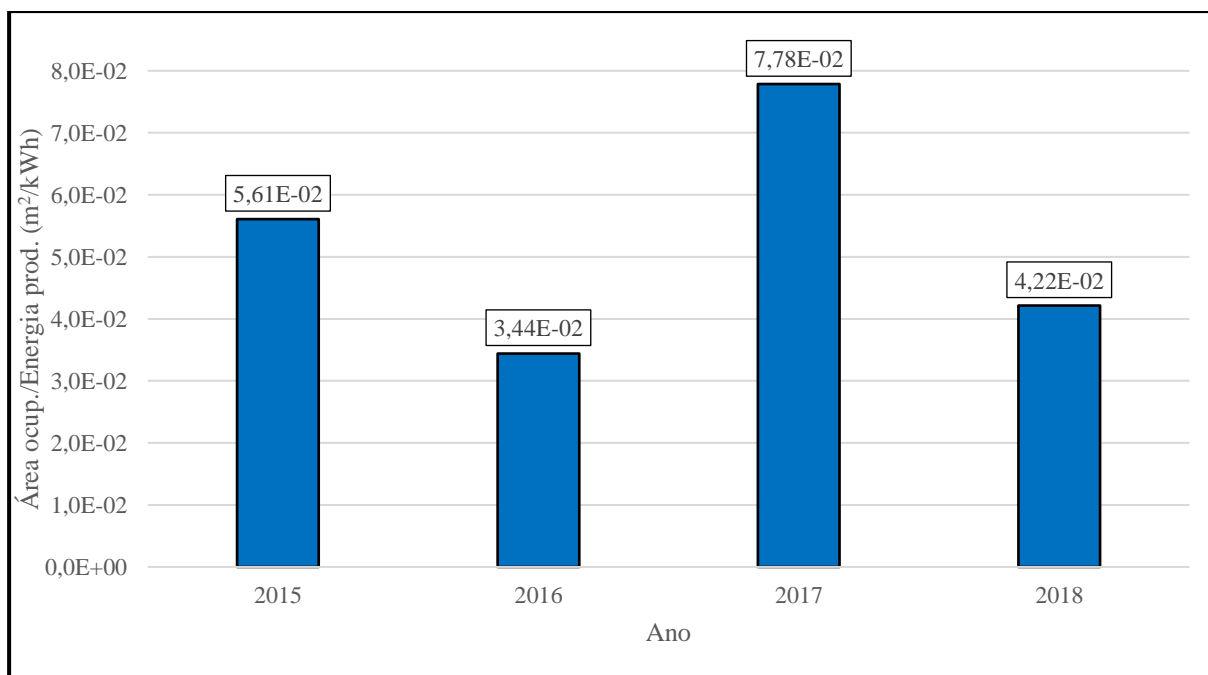


Figura 4.7: Gráfico da evolução anual da razão de área ocupada por eletricidade produzida para centrais hidroelétricas com albufeira de reserva estudadas entre 2015 e 2018, inclusive.

Na Figura 4.7 é demonstrada uma alta variação nos valores da razão área ocupada/eletricidade produzida. Tal como referido anteriormente esta variação está altamente ligada à precipitação anual sendo que em anos húmidos os valores desta razão são mais baixos, como foi o caso de 2016 e 2018. Por contrário, em anos secos, como em 2015 e 2017, os valores foram superiores, demonstrando ser necessária a ocupação de uma maior área para produção da mesma quantidade de energia elétrica. Devido à variabilidade apresentada e sendo importante a análise global dos diversos tipos de tecnologias ao longo do período em estudo, a média destes valores anuais, apresentada anteriormente, será utilizada para comparar os vários tipos de centrais.

## 5. Centrais hidroelétricas a fio-de-água

As centrais hidroelétricas a fio de água correspondem a 95 das 528 centrais estudadas. Estas centrais produzem, em média, 0,34 TWh de eletricidade anualmente, o que corresponde a 0,64% do total da energia elétrica média anual, produzida entre 2015 e 2018, em Portugal continental. Deste valor de energia, em média, 4,37% tem origem conhecida, obtida a partir das declarações ambientais da EDP <sup>[R.7],[R.8]</sup>, e 95,63% da energia teve a sua origem assumida. Ao longo do período de tempo em estudo houve alteração do valor de potência instalada tendo parte das centrais em estudo entrado em funcionamento após 2015, tendo 1 entrado em funcionamento em 2016 e outra em 2018.

Na Figura 5.1 estão representadas as centrais hidroelétricas a fio de água estudadas, que se encontravam em funcionamento entre 2015 e 2018, sobrepostas sobre o mapa de Portugal continental. Na Tabela 5.1 está apresentada a variação do número de centrais hidroelétricas a fio de água estudadas, a energia elétrica total produzida anualmente por todas as centrais deste tipo, representando, também, o total de energia elétrica produzida em Portugal continental, e as percentagens de energia com fonte conhecida e assumida, para cada um dos anos estudados.

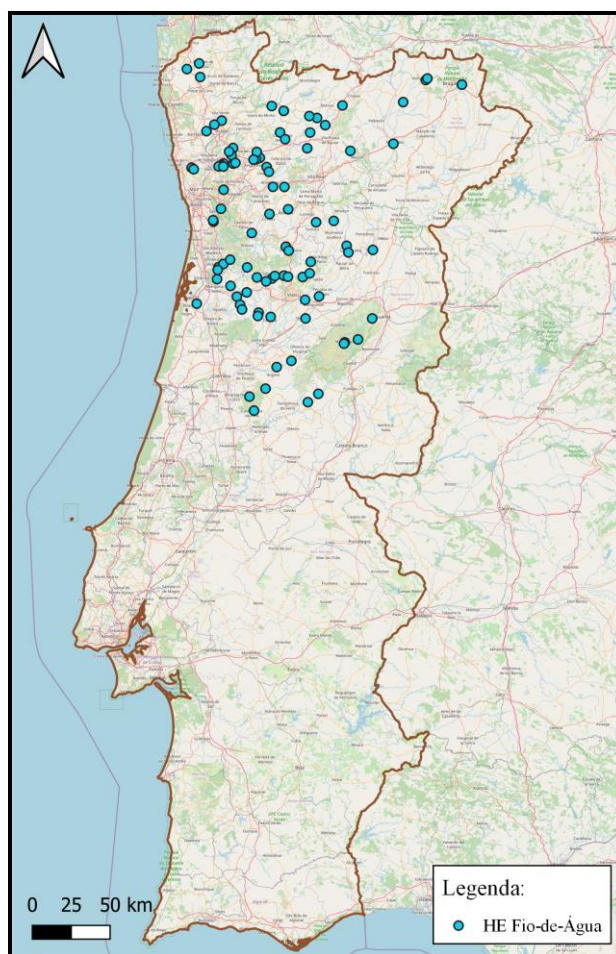


Figura 5.1: Mapa das centrais hidroelétricas a fio de água estudadas em Portugal continental entre os anos de 2015 e 2018, inclusive. (Dados provenientes do projeto e2p <sup>[R.5]</sup>).

Tabela 5.1: Evolução do número de centrais, potência instalada e energia elétrica produzida no conjunto de centrais hidroelétricas a fio de água estudadas em Portugal continental entre 2015 e 2018, inclusive, bem como as percentagens da energia elétrica total produzida com fonte conhecida e com fonte assumida.

|                                  | Ano    |        |        |        |
|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|
|                                  | 2015   | 2016   | 2017   | 2018   |
| Número de centrais estudadas     | 93     | 94     | 94     | 95     |
| Potência instalada (MW)          | 219,60 | 223,50 | 223,50 | 233,50 |
| Energia elétrica produzida (TWh) | 0,27   | 0,66   | 0,22   | 0,22   |
| Percentagem conhecida (%)        | 7,30   | 3,97   | 6,21   | 0,00   |
| Percentagem assumida (%)         | 92,70  | 96,03  | 93,79  | 100,00 |

## 5.1 Emissões na fase de construção

Para o cálculo das emissões na fase de construção para centrais hidroelétricas a fio de água foram utilizados 3 estudos diferentes, referentes a centrais localizadas em países como a Suíça ou a Índia. As Tabela 5.2, Tabela 5.3, e Tabela 5.4, contêm os valores utilizados na construção de cada uma das centrais referidas nos estudos utilizados como referência. Devido à diferença nos valores de potência instaladas destas centrais, os valores apresentados nas tabelas foram ajustados para valores de quantidade de massa de material ou energia necessária para um MW de potência instalada. No caso do betão foi sempre considerada a mesma mistura dividida em percentagens do peso total onde 84,9%, 5,4% e 9,8% correspondem a cascalho, água e cimento, respetivamente. O material denominado de aço foi considerado como aço reforçado (rebar).

*Tabela 5.2: Listagem de material utilizado para construção de uma central hidroelétrica a fio de água na Suíça com potência nominal de 8,6 MW e tempo de vida de 80 anos tal como descrito no estudo sobre inventários do ciclo de vida de centrais hidroelétricas encomendado pelo Öko-Institute [R.25].*

| Material          | Quantidade (kg/MW) | Quantidade (MWh/MW) |
|-------------------|--------------------|---------------------|
| Cimento           | 6,72E+05           | -                   |
| Cascalho          | 5,85E+06           | -                   |
| Água              | 3,71E+05           | -                   |
| Betão             | 6,89E+06           | -                   |
| Aço reforçado     | 5,50E+04           | -                   |
| Aço de baixa liga | 1,48E+05           | -                   |
| Aço cromado       | 1,07E+04           | -                   |
| Cobre             | 3,55E+03           | -                   |
| Eletricidade      | -                  | 1,79E+02            |
| Gasóleo           | -                  | 1,69E+03            |

*Tabela 5.3: Listagem de material utilizado para construção de uma central com potência nominal de 18,4 MW e tempo de vida de 50 anos tal como descrito no inventário do estudo sobre o ciclo de vida de centrais hidroelétricas a fio de água no Peru [R.28].*

| Material | Quantidade (kg/MW) | Quantidade (MWh/MW) |
|----------|--------------------|---------------------|
| Cimento  | 4,13E+05           | -                   |
| Cascalho | 1,05E+06           | -                   |
| Água     | 1,72E+05           | -                   |
| Betão    | 1,64E+06           | -                   |
| Areia    | 8,37E+05           | -                   |
| Aço      | 7,17E+04           | -                   |
| Alumínio | 1,30E+04           | -                   |
| Ferro    | 7,66E+03           | -                   |
| Cromo    | 1,24E+03           | -                   |
| Gasóleo  | -                  | 1,28E+04            |

*Tabela 5.4: Listagem de emissões associadas à construção da central hidroelétrica a fio de água Rayat, com potência nominal de 3 MW e tempo de vida de 30 anos, tal como descrito no inventário do estudo sobre o ciclo de vida deste tipo de centrais na Índia [R.29].*

| Material                   | Quantidade (kg CO <sub>2eq</sub> /MW) |
|----------------------------|---------------------------------------|
| Construção                 | 1,22E+06                              |
| Edificação                 | 1,96E+05                              |
| Comporta                   | 2,07E+05                              |
| Turbina                    | 9,93E+05                              |
| Painéis de controlo        | 1,99E+05                              |
| Estação auxiliar           | 2,29E+05                              |
| Transformador e subestação | 2,61E+05                              |

Devido à variação dos materiais considerados nos 3 estudos foram produzidos 3 estudos diferentes das emissões na fase de construção das centrais hidroelétricas a fio de água de modo a obter um valor mais próximo da realidade. Conhecendo o valor total médio de emissões de gases com efeito de estufa libertados na fase de construção por ano é possível agrupá-lo ao valor das emissões na fase de operação para cada ano em estudo e analisar o verdadeiro impacto ambiental que este tipo de central tem anualmente, sendo que estes cálculos finais serão apresentados posteriormente.

Para uma análise percentual do impacto de cada material na fase de construção deste tipo de central foi utilizado o valor médio dos totais para esta fase obtidos a partir dos 3 estudos de referência, e o estudo com o maior número de materiais utilizados, o estudo referenciado na Tabela 5.2. A partir da equação [2.31] foi obtida a percentagem do impacto de cada material no valor total desse estudo, sendo assim feita a subdivisão da emissão total pelos diversos materiais utilizados. A Figura 5.2 representa a percentagem do impacto de cada material na fase de construção, sendo possível aplicar esta mesma divisão ao valor médio dos 3 totais obtidos nesta dissertação. Assim, o valor de emissões de gases com efeito de estufa libertados em Portugal continente para cada um dos materiais utilizados nesta fase do tempo de vida das centrais hidroelétricas a fio de água foi obtido. Esta média foi considerada como o valor mais realista, equivalente a  $1 \times 10^4 \text{ t CO}_{2eq}/ano$ .

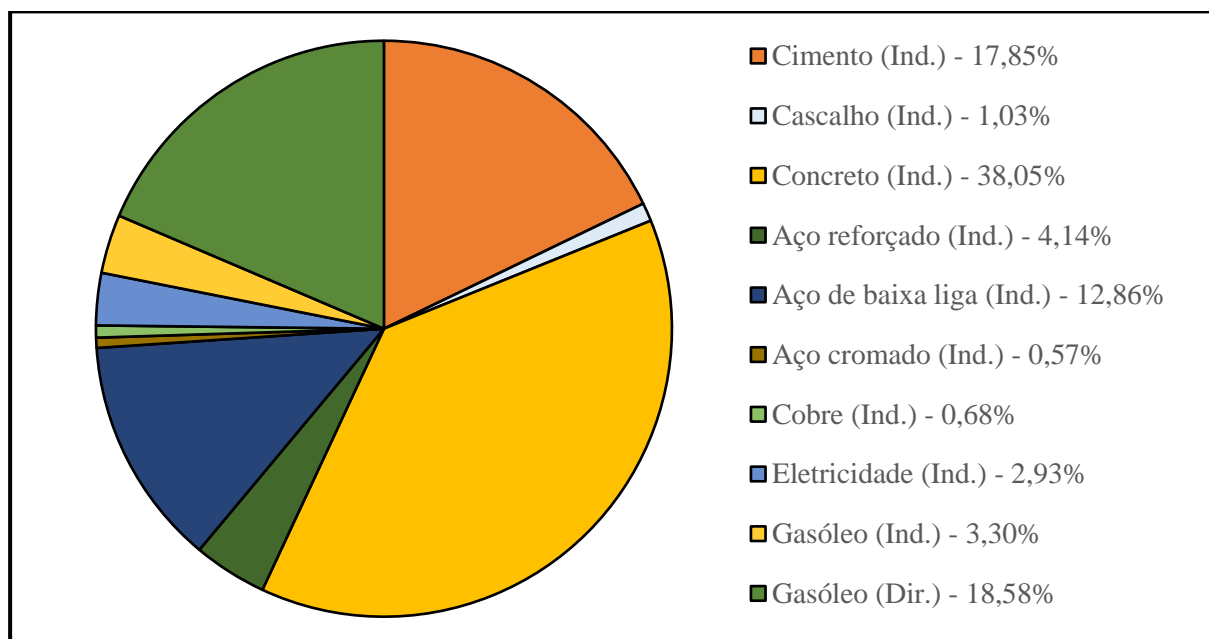


Figura 5.2: Divisão das diversas fontes de emissão na fase de construção de uma central hidroelétrica a fio de água.

Grande parte do projeto de construção deste tipo de central é a construção do açude e sistema de adução de água até à central. A construção destas duas partes integrantes no sistema de produção de energia elétrica por centrais hidroelétricas a fio de água exige grandes quantidades de betão. Assim, é natural observar na Figura 5.2 que grande parte das emissões referentes a esta fase estejam atribuídas ao betão. O cimento também ocupa uma parte importante das emissões totais da fase de construção porque este está diretamente relacionado com a produção do próprio betão, possuindo um alto fator de emissão, tal como é observável na tabela do Anexo A. A utilização de gasóleo por parte de máquinas de construção e camiões de transporte de materiais é elevada pois este tipo de central pode-se estender por uma distância grande, visto que é importante manter relativamente a mesma altura até existir um local onde possa existir uma grande queda desse nível, sendo a central construída na base dessa queda. Esse

desnível é altamente importante pois está relacionado com a energia que é possível obter a partir da água que é turbinada e, modo a encontrar essa queda abrupta, os sistemas de adução destas centrais podem-se estender por distâncias superiores a 1 km.

## 5.2 Emissões na fase de operação

De modo a calcular as emissões na fase de operação deste tipo de central não foram utilizadas as declarações ambientais da EDP pois, apesar de parte das centrais estudadas ter valores tabelados, os valores apresentados nas declarações não compreendem a totalidade do período de tempo estudo, logo não seria possível obter fatores de conversão para todos os anos em estudo. Assim, foi novamente utilizado o estudo encomendado pelo Öko-Institute <sup>[R.25]</sup> de modo a obter os valores de consumo por eletricidade produzida das centrais deste tipo, tendo estes valores sido considerados constantes ao longo do período em estudo. A lista completa de consumos está apresentada na Tabela 5.5.

*Tabela 5.5: Listagem dos consumos contabilizados nesta dissertação, presentes na fase de operação de uma central hidroelétrica a fio de água na Suíça com potência nominal de 8,6 MW e tempo de vida de 80 anos, tal como descrito no estudo sobre inventários do ciclo de vida de centrais hidroelétricas encomendado pelo Öko-Institute <sup>[R.25]</sup>.*

| Material          | Quantidade<br>(kg/MWh <sub>prod.</sub> ) |
|-------------------|--|
| SF <sub>6</sub>   | 3,40E-07                                 |
| Óleo lubrificante | 1,22E-04                                 |

É possível observar que existem duas fontes de emissões de gases com efeito de estufa na fase de operação das centrais hidroelétricas a fio de água, o SF<sub>6</sub>, e o óleo lubrificante. O SF<sub>6</sub> é um composto químico não só responsável por emissões indiretas, mas também responsável por emissões diretas quando existe uma fuga deste para a atmosfera, sendo o seu potencial de aquecimento global tabelado como equivalente a 23000 vezes a emissão da mesma massa de CO<sub>2</sub>, tal como referido no quinto relatório do IPCC para uma escala de 100 anos <sup>[R.26]</sup>. Tal como na fase de construção, estes consumos foram analisados em termos de emissões indiretas e diretas, sendo assim possível obter valores totais de emissão de gases com efeito de estufa na fase de operação. No caso das emissões diretas apenas o SF<sub>6</sub> gera emissões.

Para uma análise percentual do impacto das emissões de cada material na fase de operação foi utilizado o estudo anteriormente referido, os valores médios anuais das emissões indiretas e diretas dos consumos analisados, e, também, a média das emissões totais provenientes da fase de operação no período entre 2015 e 2018. O valor total médio de emissões de gases com efeito de estufa é de 3 t CO<sub>2eq</sub>/ano e a Figura 5.3 corresponde à subdivisão deste valor pelas diversas fontes de emissões existentes na fase de operação.

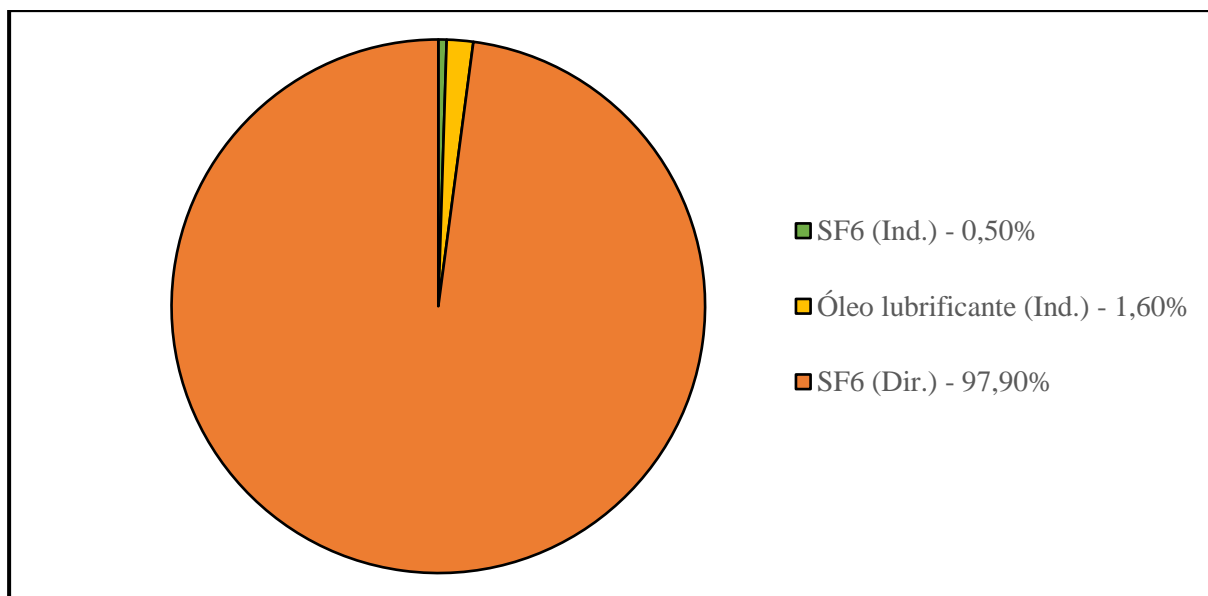


Figura 5.3: Divisão das diversas fontes de emissão na fase de operação de uma central hidroelétrica a fio de água.

Analisando a Figura 5.3, é possível observar que as emissões associadas à fuga de SF<sub>6</sub> para a atmosfera correspondem quase à totalidade de emissões na fase de operação das centrais hidroelétricas a fio de água.

### 5.3 Análise do perfil de emissões anuais

Com base no valor total médio das emissões anuais na fase de construção e os valores de emissões anuais na fase de operação obtidos anteriormente foi possível construir a Figura 5.4, apresentada abaixo. Esta figura representa não só a diferença de impacto entre as emissões em fase de construção e operação, mas também a variação do total de ambas ao longo do período em estudo. A barra de erro demonstra a variabilidade do valor das emissões totais em fases de construção entre o valor mínimo e máximo obtido a partir dos 3 estudos utilizados.

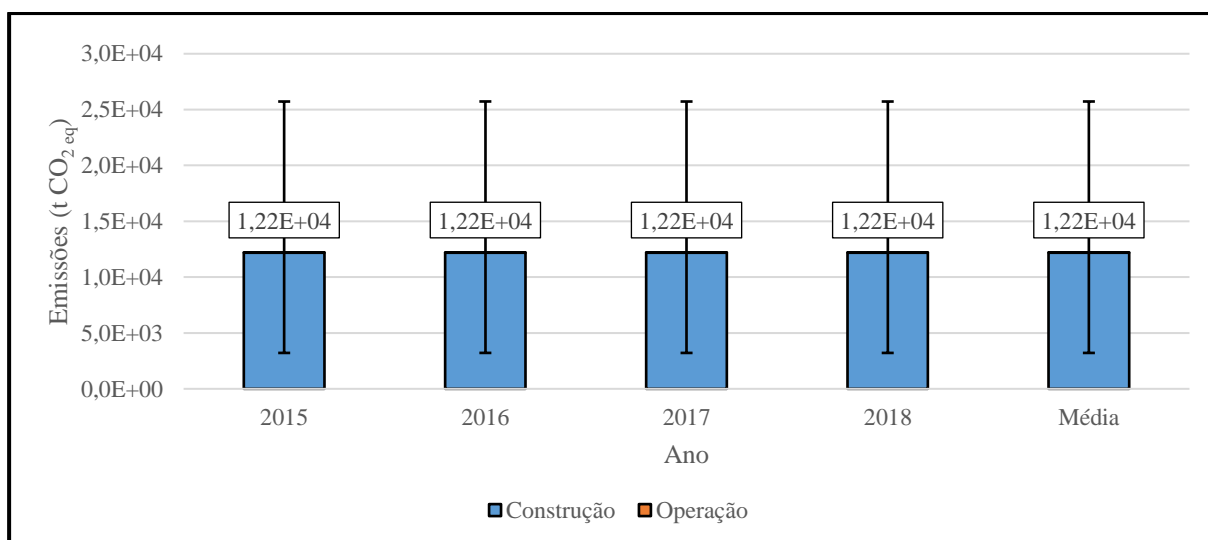


Figura 5.4: Gráfico da variação anual das emissões de gases com efeito de estufa nas fases de construção e operação, e, por sua vez, das emissões totais, referentes às centrais hidroelétricas a fio de água em funcionamento em Portugal continental entre 2015 e 2018, inclusive, e a média destes valores. No gráfico também encontra-se representado o erro presente nos cálculos referentes a estas centrais, efetuados nesta dissertação.



Na Figura 5.4 observa-se uma dominância da fase de construção no total das emissões estudadas deste tipo de centrais sendo o valor das suas emissões muito superior aos valores da fase de operação em todos os anos estudados, sendo que, em termo de valores médio, as emissões da fase de construção ocupam 99,98% das emissões totais. Estes resultados são os esperados pois a produção de energia elétrica por este tipo de centrais não produz diretamente emissões para a atmosfera como nas centrais termoelétricas com a queima de combustíveis fósseis e, como referido anteriormente, devido as dimensões e quantidades de material necessário, é natural que o valor das emissões associadas à fase de construção seja elevado. A barra de erro demonstra a grande variação entre o valor mínimo e máximo sendo que esta grande amplitude é apenas representada pela variação do valor de emissões de gases com efeito de estufa calculados na fase de construção, o que demonstra a grande variedade de valores obtidos em estudos e a necessidade de utilizar várias fontes de modo a obter um valor mais próximo da realidade.

#### 5.4 Fator de emissão

Com o conhecimento das emissões totais reais, obtidas pela junção das emissões totais da fase de construção e operação, foi obtido o fator de emissão de gases com efeito de estufa em função da energia elétrica produzida pelas centrais hidroelétricas a fio-de-água em Portugal continental não só para cada ano em estudo, mas também uma média destes valores, estando estes apresentados na Tabela 5.6.

*Tabela 5.6: Fator de emissão total médio calculado anualmente para centrais hidroelétricas a fio de água e a sua média de valores.*

| Fator de emissão médio<br>( $g\ CO_{2eq}/kWh$ ) | Ano   |       |       |       |       |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
|   | 2015  | 2016  | 2017  | 2018  | Média |
| Total   | 44,44 | 18,60 | 54,84 | 56,66 | 35,66 |

Com a Tabela 5.6 foi, posteriormente, possível calcular o fator de emissão real do *mix* de geração de energia elétrica de Portugal continental. O cálculo deste fator e a comparação dos fatores de emissão dos vários tipos de central serão apresentados posteriormente no capítulo referente aos resultados totais.

#### 5.5 Área ocupada

Com a lista de centrais e com o auxílio de mapas projetados, vetorizaram-se, em ambiente SIG, os polígonos representativos da área geográfica de cada central, sendo importante referir que no caso das centrais hidroelétricas a fio de água foram tidos em conta as estradas de acesso à central, a central em si, os açudes e todo o canal hidráulico entre o açude e a central e o seguimento deste até a água retomar ao curso de água. A Figura 5.5 mostra um exemplo dos polígonos desenhados.

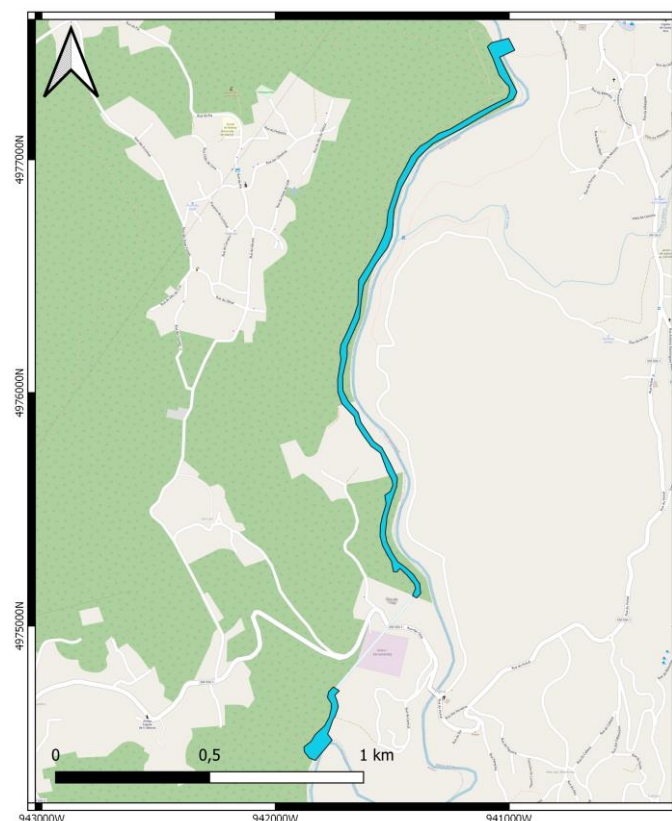


Figura 5.5: Exemplo de área de uma central hidroelétrica a fio de água mapeada. Neste exemplo é observável a área correspondente ao açude, canal hidráulico à superfície e a central do Palhal.

A partir dos polígonos vetorizados foi possível determinar o valor total de área ocupada por cada central. A Tabela 5.7 apresenta a variação da área ocupada pelas centrais hidroelétricas a fio de água ao longo do período de tempo estudado e a correspondente percentagem da área de Portugal continental associada ao mesmo tipo de centrais.

Tabela 5.7: Evolução da área ocupada para produção de energia elétrica através de centrais hidroelétricas a fio de água durante o período de estudo, 2015 a 2018, inclusive, e a sua ocupação percentual da área de Portugal continental <sup>[R.27]</sup>.

|                                     | Ano   |       |       |       |       |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                     | 2015  | 2016  | 2017  | 2018  | Média |
| Área total (km <sup>2</sup> )       | 1,08  | 1,11  | 1,11  | 1,11  | 1,10  |
| Percentagem de ocupação do país (%) | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |

Tal como observado na Tabela 5.7, existiu um ligeiro aumento na área ocupada pelas centrais hidroelétricas a fio de água ao longo do período de tempo em estudo. Apesar disso, a percentagem de ocupação do país por este tipo de centrais é bastante baixa, 0,001% da área de Portugal continental, sendo a área total no fim do período estudado equivalente a 156 campos de futebol com dimensões de 105 × 68 m.

## 5.6 Erro associado à área ocupada

De modo a calcular o erro associado aos valores de área ocupada por cada central hidroelétrica a fio de água, foram utilizados valores teóricos baseados na produção de energia esperada por centrais deste tipo. O valor utilizado é correspondente a  $4,52 \text{ km}^2/\text{TWh}$ , adaptado do estudo encomendado pelo Öko-Institute <sup>[R.25]</sup>, e a Tabela 5.8 apresenta os valores de área ocupada calculada nesta dissertação, a área teoricamente ocupada e o erro existente ao longo dos anos estudados.

Tabela 5.8: Comparação da área total obtida e área teoricamente necessária, e erro associado ao longo dos anos em estudo.

|  | Ano   |       |       |       |       |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|
|  | 2015  | 2016  | 2017  | 2018  | Média |
| Área total ( $\text{km}^2$ )                     | 1,08  | 1,11  | 1,11  | 1,11  | 1,10  |
| Área teórica <sup>[R.25]</sup> ( $\text{km}^2$ ) | 1,24  | 2,97  | 1,01  | 0,97  | 1,55  |
| Erro associado às áreas obtidas (%)              | 12,75 | 62,59 | 10,34 | 14,40 | 28,62 |

Devido a existir uma grande dificuldade em delinear a área ocupada por este tipo de centrais, o valor teórico apenas representa um valor médio que pode variar bastante dependendo das condições do terreno e do potencial hídrico do local onde foram instaladas este tipo de centrais. É de notar que no ano de 2016, o erro foi muito mais elevado não devido à grande variação na área calculada mas sim no grande aumento da energia produzida que ocorreu nesse ano. Embora nos anos húmidos é produzida mais energia na mesma área geográfica, ao utilizar um valor estático para o cálculo da área teórica, esta irá variar, influenciando drasticamente o erro obtido.

## 5.7 Análise à área ocupada

O valor total da área ocupada por este tipo de centrais foi cruzado com os valores de potência instalada e de eletricidade produzida em cada ano de modo a obter informação sobre a utilização do espaço ocupado por estas centrais. A partir das equações [2.46] e [2.47], foram obtidos dois resultados distintos para a utilização da área para cada ano, sendo estes as razões área ocupada/potência instalada, e área ocupada/eletricidade produzida. As Figura 5.6 e Figura 5.7 são referentes às variações anuais destas duas razões ao longo do período em estudo. Em termos de valores médios para a razão área ocupada/potência instalada, e área ocupada/eletricidade produzida, foi obtido o valor  $5 \text{ m}^2/\text{kW}$  e  $3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{kWh}$ , respetivamente.

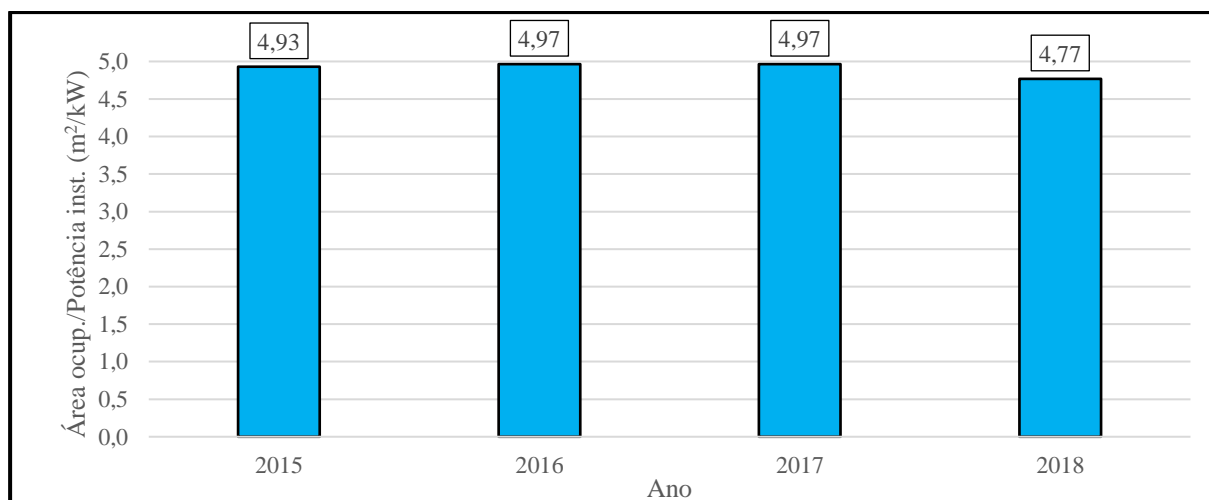


Figura 5.6: Gráfico da evolução anual da razão de área ocupada por potência instalada para centrais hidroelétricas a fio de água estudadas entre 2015 e 2018, inclusive.

Como é possível observar na Figura 5.6, existiu apenas uma diminuição mais aparente do valor da razão no último ano em estudo, de  $4,97 \text{ m}^2/\text{kW}$  para  $4,77 \text{ m}^2/\text{kW}$ , o que demonstra que existiu um ligeiro melhoramento na repartição do espaço total ocupado por este tipo de centrais para produção de energia elétrica devido à instalação de novas centrais que permitiram, por sua vez, a instalação de uma maior potência por unidade de área. No capítulo dos resultados totais esta razão será comparada para os diversos tipos de centrais, sendo utilizado o valor médio ao longo do período estudado da mesma, referido anteriormente.

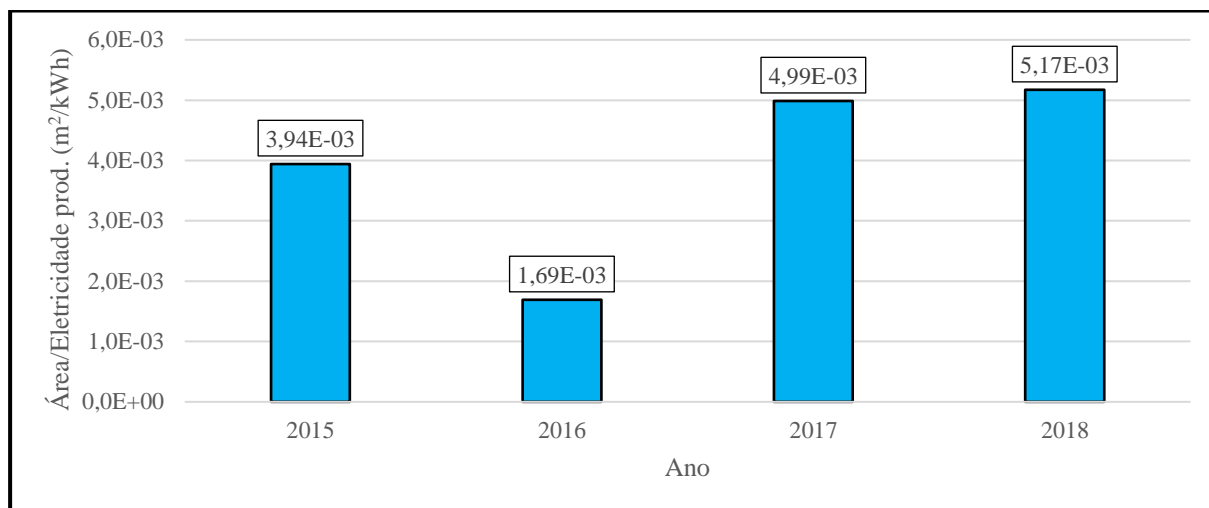


Figura 5.7: Gráfico da evolução anual da razão de área ocupada por eletricidade produzida para centrais hidroelétricas a fio de água estudadas entre 2015 e 2018, inclusive.

Na Figura 5.7 é visível uma variação nos valores da razão área ocupada/eletricidade produzida, especialmente no ano de 2016. Sendo que existiu um apenas um aumento de 3% da área ocupada por este tipo de centrais de 2015 para 2018, foi possível teorizar que esta variação foi causada apenas pela variação da energia elétrica produzida anualmente pelas centrais. Ao analisar novamente a Tabela 3.4 é observado que a eletricidade produzida anualmente por este tipo de centrais mantém-se estável exceto em 2016, onde existe um aumento para 239% da energia produzida no ano anterior, confirmando, assim, o aumento registado na razão de área ocupada por eletricidade produzida. Tal como referido anteriormente esta variação está altamente ligada à precipitação anual. Logo, de modo a combater esta variabilidade e sendo importante a análise global dos diversos tipos de tecnologias ao longo do período em estudo, a média destes valores será utilizada posteriormente para comparar os diversos tipos de centrais.

## 6. Centrais termoelétricas a carvão

As centrais termoelétricas a carvão correspondem a 2 das 528 centrais estudadas nesta dissertação sendo que, em média, produzem anualmente 14,86 TWh de eletricidade, o que corresponde a 27,80% da energia elétrica média produzida anualmente no período de 2015 a 2018, em Portugal continental. Deste valor médio de energia produzida, 88,75% tem origem conhecida, que pode ser traçada às declarações ambientais da EDP <sup>[R.13],[R.14]</sup>, sendo que, em média, a fonte de 11,25% da energia foi assumida. Ao longo do período de tempo em estudo não houve alteração do valor de potência instalada pois todas as centrais em estudo foram construídas antes ou em 2015.

Na Figura 6.1 estão as centrais termoelétricas a carvão, em funcionamento entre 2015 e 2018, estudadas sobrepostas sobre o mapa de Portugal continental. Na Tabela 6.1 está representada a variação do número de centrais termoelétricas a carvão em funcionamento estudadas, a energia elétrica total produzida anualmente por todas as centrais deste tipo, que representa, também, o total de eletricidade produzida em Portugal continental, e as percentagens de energia com fonte conhecida e de fonte assumida, para cada um dos anos estudados.

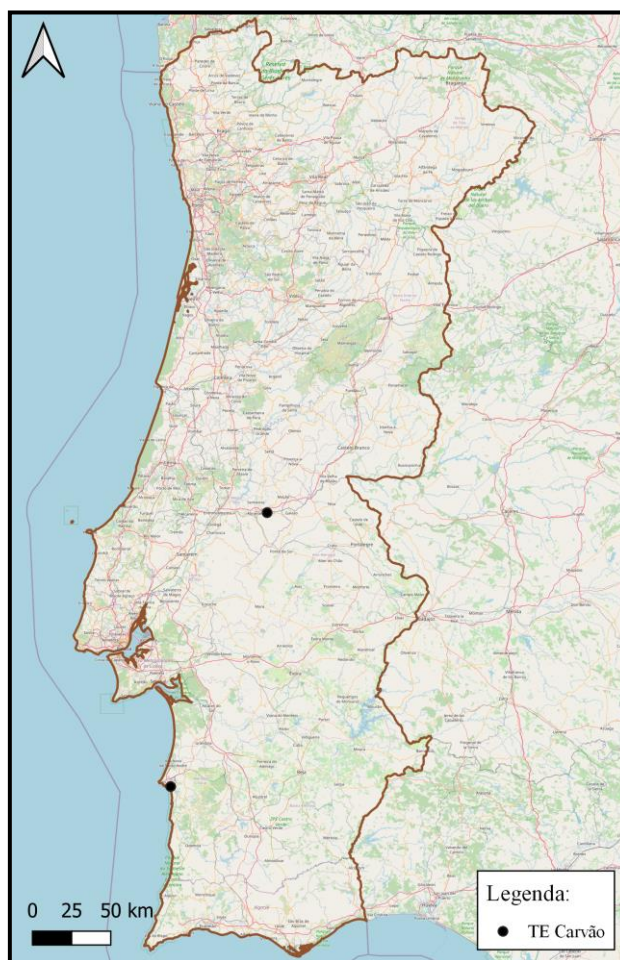


Figura 6.1: Mapa das centrais termoelétricas a carvão estudadas em Portugal continental entre os anos de 2015 e 2018, inclusive. (Dados provenientes do projeto e2p <sup>[R.5]</sup>).

Tabela 6.1: Evolução do número de centrais, potência instalada e energia elétrica produzida no conjunto de centrais termoelétricas a carvão estudadas em Portugal continental entre 2015 e 2018, inclusive, bem como as percentagens da energia elétrica total produzida com fonte conhecida e com fonte assumida.

|                                  | Ano   |       |        |       |
|----------------------------------|-------|-------|--------|-------|
|                                  | 2015  | 2016  | 2017   | 2018  |
| Número de centrais estudadas     | 2     | 2     | 2      | 2     |
| Potência instalada (MW)          | 1884  | 1884  | 1884   | 1884  |
| Energia elétrica produzida (TWh) | 16,09 | 13,97 | 15,948 | 13,42 |
| Percentagem conhecida (%)        | 89,37 | 88,30 | 89,79  | 87,55 |
| Percentagem assumida (%)         | 10,63 | 11,70 | 10,21  | 12,45 |

## 6.1 Emissões na fase de construção

Para o cálculo das emissões na fase de construção para centrais termoelétricas a carvão foram utilizados 4 estudos diferentes, cada um referente a uma central diferente, localizada em países como a Suíça, Estados Unidos da América ou China. As Tabelas 6.2, 6.3, 6.4, e 6.5 contêm os valores retirados destes estudos que foram utilizados para os cálculos das emissões na fase de construção de cada uma das centrais a que são referentes. Devido às diferenças nos valores de potência instalada nas centrais dos estudos, os valores apresentados em termos de massa de material ou energia necessária foram ajustados para um MW de potência instalada. É, também, importante ter em conta que no caso do betão foi sempre considerada a mesma mistura dividida em percentagens do peso total onde 84,9%, 5,4% e 9,8% correspondem a cascalho, água e cimento, respetivamente. Em termos dos materiais denominados de aço e aço sem liga, foi considerado que ambos eram referentes ao aço reforçado (rebar).

*Tabela 6.2: Listagem de material utilizado para construção de uma central com potência nominal de 460 MW e tempo de vida de 30 anos tal como descrito no inventário do estudo relativo ao ciclo de vida de centrais termoelétricas a carvão nos Países Baixos [R.30].*

| Material          | Quantidade (kg/MW) | Quantidade (MWh/MW) |
|-------------------|--------------------|---------------------|
| Cascalho          | 2,77E+06           | -                   |
| Água              | 1,76E+05           | -                   |
| Cimento           | 3,20E+05           | -                   |
| Betão             | 3,27E+06           | -                   |
| Aço sem liga      | 8,77E+04           | -                   |
| Aço de baixa liga | 8,77E+03           | -                   |
| Aço de alta liga  | 9,74E+02           | -                   |
| Alumínio          | 7,22E+02           | -                   |
| Lã mineral        | 1,24E+03           | -                   |
| Cobre             | 1,54E+03           | -                   |
| Polietileno       | 8,72E+02           | -                   |
| Eletricidade      | -                  | 3,26E+01            |
| Gasóleo           | -                  | 1,39E+02            |
| Óleo combustível  | -                  | 1,39E+02            |

*Tabela 6.3: Listagem de material utilizado na construção de uma central termoelétrica a carvão com potência nominal de 500 MW e tempo de vida de 30 anos tal como descrito no relatório da Ecoinvent sobre o ciclo de vida do sistema energético de diversos países da UCTE [R.19].*

| Material                         | Quantidade (kg/MW) | Quantidade (MWh/MW) |
|----------------------------------|--------------------|---------------------|
| Cascalho                         | 4,25E+02           | -                   |
| Água                             | 2,70E+01           | -                   |
| Cimento                          | 4,90E+01           | -                   |
| Betão                            | 5,00E+02           | -                   |
| Aço sem liga                     | 1,44E+02           | -                   |
| Aço de baixa liga                | 1,44E+01           | -                   |
| Aço de alta liga                 | 1,60E+00           | -                   |
| Cobre                            | 2,60E+00           | -                   |
| Alumínio                         | 1,20E+00           | -                   |
| Lã mineral                       | 1,50E+00           | -                   |
| Plástico                         | 2,00E+00           | -                   |
| Eletricidade                     | -                  | 5,55E-02            |
| Gasóleo (Máquinas de construção) | -                  | 2,38E-01            |
| Gasóleo (Aquecimento)            | -                  | 2,38E-01            |



Tabela 6.4: Listagem de material utilizado na construção de uma central com potência nominal de 360 MW e tempo de vida de 30 anos tal como descrito no relatório da NREL sobre o ciclo de vida de centrais termoelétricas a carvão nos EUA <sup>[R.17]</sup>.

| Material                         | Quantidade (kg/MW) | Quantidade (MWh/MW) |
|----------------------------------|--------------------|---------------------|
| Cascalho                         | 3,74E+02           | -                   |
| Água                             | 2,38E+01           | -                   |
| Cimento                          | 4,32E+01           | -                   |
| Betão                            | 4,41E+02           | -                   |
| Aço                              | 1,41E+02           | -                   |
| Alumínio                         | 1,16E+00           | -                   |
| Ferro                            | 1,72E+00           | -                   |
| Eletricidade                     | -                  | 5,55E-02            |
| Gasóleo (Maquinas de construção) | -                  | 2,38E-01            |
| Gasóleo (Aquecimento)            | -                  | 2,38E-01            |

Tabela 6.5: Listagem de material utilizado na construção de uma central com potência nominal de 843,6 MW e tempo de vida de 30 anos tal como descrito num estudo referente ao ciclo de vida de centrais termoelétricas a carvão na China <sup>[R.31]</sup>.

| Material                         | Quantidade (kg/MW) | Quantidade (MWh/MW) |
|----------------------------------|--------------------|---------------------|
| Cascalho                         | 9,28E+05           | -                   |
| Água                             | 5,90E+04           | -                   |
| Cimento                          | 1,07E+05           | -                   |
| Betão                            | 1,09E+06           | -                   |
| Aço                              | 2,11E+04           | -                   |
| Alumínio                         | 2,13E+02           | -                   |
| Cobre                            | 1,28E+02           | -                   |
| Eletricidade                     | -                  | 5,55E-02            |
| Gasóleo (Maquinas de construção) | -                  | 2,38E-01            |
| Gasóleo (Aquecimento)            | -                  | 2,38E-01            |

Ao analisar as tabelas anteriores, é possível observar que não só existe variação dos materiais considerados como também das quantidades utilizadas do mesmo material. Sendo assim, foram feitos 4 estudos diferentes das centrais termoelétricas na fase de construção das mesmas de modo a obter um valor mais próximo da realidade. Para um cálculo mais pormenorizado das emissões reais foram tidas em conta as emissões indiretas e diretas de cada material em estudo e, para isso, foi necessário analisar o propósito do uso de cada material. No caso destes 4 estudos, apenas o gasóleo e o óleo combustível possuíam emissões diretas. Posteriormente, foi possível agrupar o valor total médio obtido para todas as emissões na fase de construção ao valor das emissões na fase de operação para cada ano em estudo e analisar o verdadeiro impacto ambiental que este tipo de central tem.

Com base no valor médio das emissões finais dos quatro estudos e do estudo com a maior variedade de materiais utilizados foi possível conceber uma análise percentual do impacto das emissões diretas e indiretas de cada material na fase de construção deste tipo de central. Após obter a percentagem do impacto que cada material tem no valor total do estudo com o maior número de materiais utilizados, foi possível construir a Figura 6.2. Esta divisão pode também ser aplicada ao valor médio dos 4 estudos utilizados de modo a obter o valor anual de emissões de gases com efeito de estufa em Portugal continente para cada um dos materiais. A partir da média dos totais de cada estudo, foi obtido um valor médio final considerado o mais realista equivalente a  $2 \times 10^4 \text{ t CO}_{2eq}/ano$ .

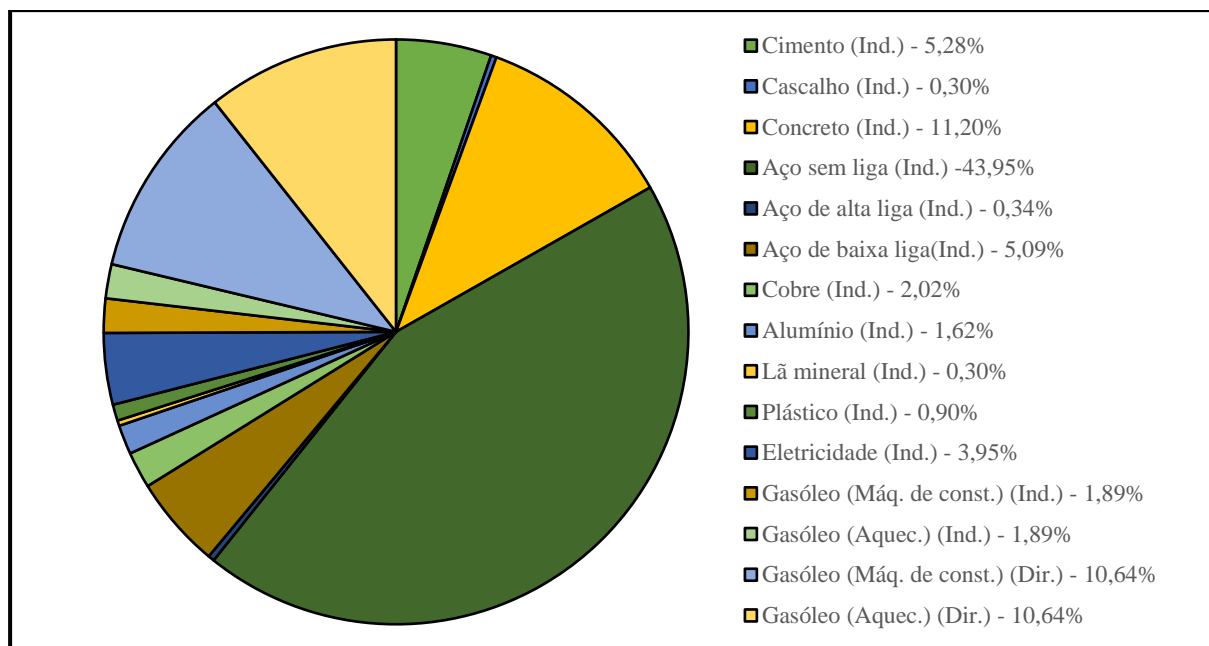


Figura 6.2: Divisão das diversas fontes de emissão na fase de construção de uma central termoelétrica a carvão.

Ao analisar esta figura, observou-se que as emissões indiretas referentes ao aço sem liga representam a maior fatia das emissões na fase de construção. Apesar disso, o seu valor não é suficiente para afirmar-se que este material é a fonte dominante de emissões, pois tanto as emissões associadas ao betão como ambas as emissões diretas associadas ao uso do gasóleo representam também fatias importantes das emissões totais.

## 6.2 Emissões na fase de operação

Para o cálculo das emissões na fase de operação foi utilizado como base as declarações ambientais da EDP <sup>[R.13],[R.14]</sup>, onde estão discriminados os consumos de parte das centrais termoelétricas a carvão. De modo a replicar estes valores para as centrais com valores desconhecidos, foram utilizados fatores de conversão baseados na relação entre o consumo e a eletricidade produzida das centrais com valores conhecidos, sendo esta relação específica para cada um dos consumos e para cada ano estudado de modo a serem mais próximos da realidade. A lista completa de consumos está apresentada na Tabela 6.6, bem como os fatores de conversão associados a cada consumo para cada ano.



Tabela 6.6: Lista de fatores de conversão utilizados, calculados a partir dos consumos analisados para as centrais termoelétricas a carvão presentes nas declarações ambientais da EDP [R.13], [R.14].

| Consumo                     | Fator de conversão (/GWh <sub>prod.</sub> ) |          |          |          |
|-----------------------------|---|----------|----------|----------|
|                             | 2015  | 2016     | 2017     | 2018     |
| Eletricidade (GWh)          | 6,60E-02                                    | 7,47E-02 | 6,93E-02 | 7,58E-02 |
| Carvão (kg)                 | 3,57E+05                                    | 3,68E+05 | 3,57E+05 | 3,71E+05 |
| Óleo combustível (kg)       | 3,52E+02                                    | 7,21E+02 | 3,08E+02 | 7,54E+02 |
| Propano (kg)                | 1,64E+00                                    | 1,38E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 |
| Gasóleo (kg)                | 0,00E+00                                    | 1,88E+01 | 5,92E-01 | 4,25E+00 |
| Ácido Clorídrico (kg)       | 1,65E+02                                    | 2,30E+02 | 2,01E+02 | 5,37E+01 |
| Amónia (kg)                 | 2,01E+03                                    | 2,19E+03 | 2,25E+03 | 1,90E+03 |
| Hidróxido de Sódio (kg)     | 9,20E+01                                    | 1,54E+02 | 1,44E+02 | 2,76E+00 |
| Calcário (kg)               | 7,94E+03                                    | 6,78E+03 | 7,63E+03 | 8,25E+03 |
| Cloreto de Ferro (III) (kg) | 2,61E+00                                    | 1,61E+00 | 2,07E+00 | 2,99E+00 |
| Sulfato de Alumínio (kg)    | 5,79E-01                                    | 3,44E-01 | 2,96E-01 | 6,89E-01 |
| Hidrogénio (kg)             | 1,39E-01                                    | 1,43E-01 | 1,81E-01 | 2,67E-01 |
| Óleo lubrificante (kg)      | 3,57E+00                                    | 2,98E+00 | 1,28E+00 | 4,83E+00 |
| Dióxido de Carbono (kg)     | 1,74E+00                                    | 3,21E+00 | 3,65E+00 | 1,95E+00 |
| Solventes (kg)              | 5,79E-02                                    | 1,61E-01 | 5,92E-02 | 9,19E-02 |

Analisando a Tabela 6.6 é possível observar que existe alguma variabilidade nos valores dos fatores de conversão. Sendo o carvão o combustível utilizado neste tipo de centrais é natural observar que o seu consumo representa a maior fatia do consumo para produção de energia elétrica. Tal como na fase de construção, estes consumos foram analisados em termos de emissões indiretas e diretas. Neste caso os consumos que possuem, para além de emissões indiretas, também, emissões diretas são o carvão, óleo combustível, propano, gasóleo, que emitem gases com efeito de estufa quando queimados no processo de produção de energia, e o calcário, que ao ser utilizado na dessulfuração de gases de combustão tem como produto da reação o dióxido de carbono.

Em relação à análise percentual do impacto de cada consumo nas emissões totais de gases com efeito de estufa na fase de operação deste tipo de central, sendo que apenas foram utilizadas as declarações ambientais da EDP [R.13],[R.14] para cálculo das emissões em fase de operação, foram utilizados valores médios das emissões indiretas e diretas para cada consumo e, também, do total das emissões provenientes da fase de operação no período entre 2015 e 2018. O valor total médio de emissões de gases com efeito de estufa é de  $2 \times 10^7 \text{ t } CO_{2eq}/ano$  e a Figura 6.3, apresentada abaixo, corresponde à subdivisão deste valor pelos diversos consumos.

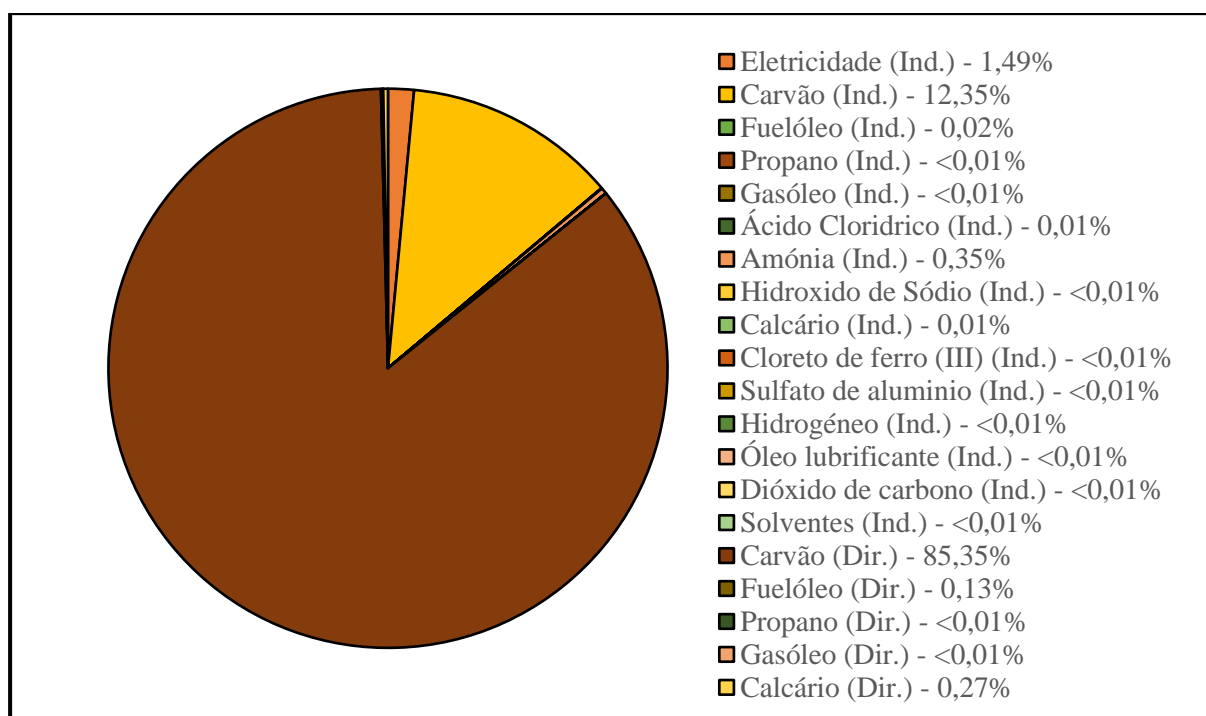


Figura 6.3: Divisão das diversas fontes de emissão na fase de operação de uma central termoelétrica a carvão.

Analisando a Figura 6.3 é possível observar que as emissões diretas da queima de carvão correspondem a grande parte das emissões na fase de operação e juntamente com as emissões indiretas associadas ao mesmo material, correspondem praticamente à totalidade de emissões nesta fase. As emissões associadas à eletricidade estão diretamente relacionadas com o *mix* de geração de energia elétrica existente em Portugal continental no período de tempo estudado, sendo que a utilização de tipos de tecnologia de produção de energia elétrica com valores superiores ou inferiores de gases com efeito de estufa emitidos em comparação com os utilizados no *mix* de geração de energia elétrica existente terá influência nas emissões libertadas pelo consumo de eletricidade. Mesmo assim, devido às emissões indiretas e diretas associadas ao carvão constituírem 98% das emissões totais, é possível desprezar o resto das emissões desta fase.

### 6.3 Análise do perfil de emissões anuais

Com base no valor total médio das emissões anuais na fase de construção obtido anteriormente e com o valor total de emissões na fase de operação referentes a cada ano estudado é possível construir a Figura 6.4, que compara não só as emissões em fase de construção e operação, mas também a variação do seu total ao longo do período em estudo. Nesta figura também é apresentada uma barra de erro que demonstram a variabilidade do valor das emissões totais da fase de construção entre o valor mínimo e máximo obtido a partir dos 4 estudos utilizados.

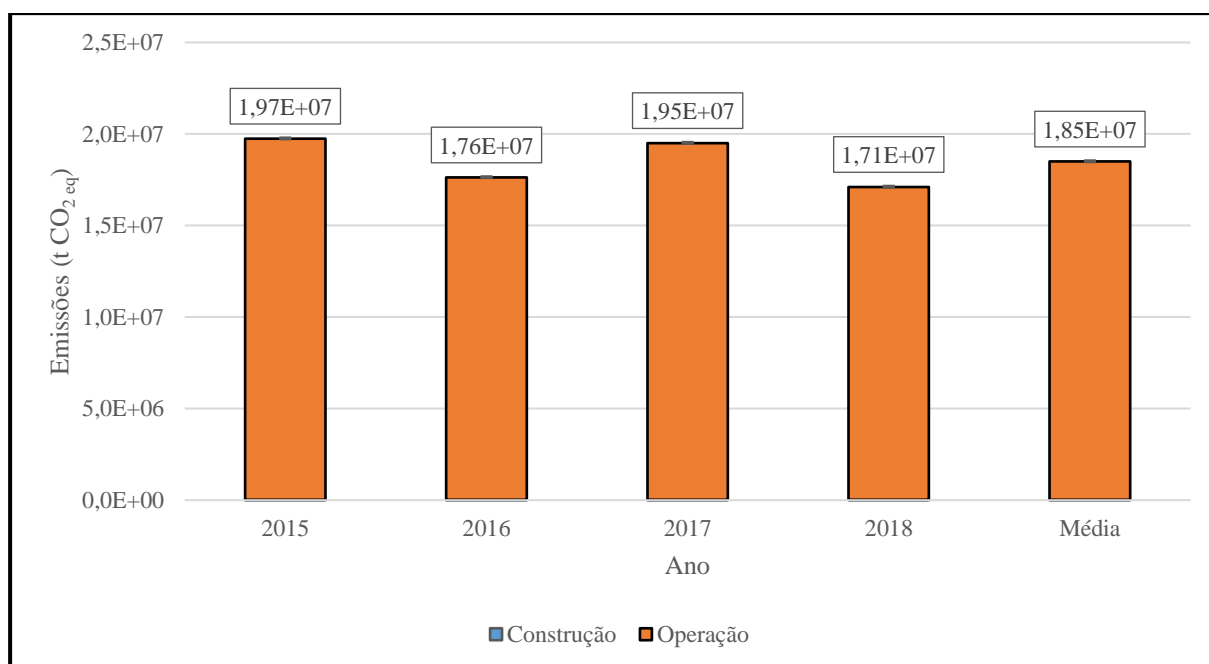


Figura 6.4: Gráfico da variação anual das emissões de gases com efeito de estufa nas fases de construção e operação, e, por sua vez, das emissões totais, referentes às centrais termoelétricas a carvão em funcionamento em Portugal continental entre 2015 e 2018, inclusive, e a média destes valores. No gráfico também encontra-se representado o erro presente nos cálculos referentes a estas centrais, efetuados nesta dissertação.

Analisando a Figura 6.4 é possível observar a grande diferença entre as emissões na fase de construção e de operação, sendo que o valor das primeiras tem uma ordem de grandeza tão baixa em comparação ao valor das segundas que a sua influência nas emissões totais anuais deste tipo de centrais é quase inexistente sendo que, em termos médios, a fase de operação constitui 99,90% das emissões totais. Em relação ao erro existente na fase de construção, devido à discrepância entre os valores referentes às 2 fases em estudo, a variação entre valor mínimo e máximo de emissões nessa fase também produz uma influência quase inexistente quando agrupada com os valores de emissão da fase de operação.

#### 6.4 Emissões diretas para a produção de eletricidade

No caso das emissões diretas para produção de eletricidade, de todos os consumos referidos na Tabela 6.6, foram apenas tidas em conta as emissões diretas do consumo da matéria-prima principal utilizada para a produção de eletricidade neste tipo desta central, o carvão, sendo que o valor médio de emissões é equivalente a  $2 \times 10^7 \text{ t CO}_{2eq}/ano$ .

#### 6.5 Fator de emissão

Com o conhecimento das emissões totais, compostas por todas as emissões presentes nas duas fases estudadas, e das emissões diretas da queima de carvão na fase de operação, foi possível obter um valor para o fator de emissão de gases com efeito de estufa em função da energia elétrica produzida pelas centrais termoelétricas a carvão em Portugal continental não só para cada ano em estudo mas também uma média destes valores, estando estes apresentados na Tabela 6.7.

Tabela 6.7: Fatores de emissão direta e total médio calculado anualmente para centrais termoelétricas a carvão e a média dos seus valores.

| Fator de emissão médio<br>( $g\ CO_{2eq}/kWh$ ) | Ano     |         |         |         |         |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|
|   | 2015    | 2016    | 2017    | 2018    | Média   |
| Direta  | 1046,19 | 1076,13 | 1044,14 | 1085,77 | 1061,62 |
| Total   | 1227,30 | 1261,67 | 1223,75 | 1274,44 | 1245,08 |

É possível observar que, na Tabela 6.7, o fator de emissão direta é próximo do valor total de emissões calculadas pois as emissões da fase de operação constituem quase a totalidade das emissões totais e das emissões dessa fase, as associadas à queima de carvão ocupam 85% do total. Assim, tal como esperado, em média, o fator de emissão direta corresponde a 85% do fator de emissão total.

Com esta tabela foi posteriormente possível calcular o fator de emissão real do *mix* de geração de energia elétrica de Portugal continental e o fator de emissão direta do mesmo *mix* de geração de energia elétrica, sendo que este último aproxima-se mais dos valores normalmente tabelados. Esta comparação de fatores de emissão será apresentada posteriormente no capítulo referente aos resultados totais.

## 6.6 Área ocupada

A partir da listagem de centrais devidamente georreferenciadas e com o auxílio de programa SIG, vetorizaram-se polígonos representativos da área geográfica de cada central. No caso das centrais termoelétricas a carvão foram tidos em conta as estradas de acesso, ou parte delas, e os canais de água para arrefecimento associados a cada central. A Figura 6.5 é um exemplo dos polígonos desenhados.



Figura 6.5: Exemplo de área de uma central termoelétrica a carvão mapeada. Neste exemplo é observável a área correspondente à central de Sines e os canais de adução de água associados a ela.

A partir desses polígonos foi determinado o valor relativo à área total ocupada por este tipo de centrais. A Tabela 6.8 apresenta a variação desses valores ao longo do período de tempo estudado e a

correspondente percentagem da área de Portugal continental ocupada associada ao mesmo tipo de centrais.

*Tabela 6.8: Evolução da área ocupada para produção de energia elétrica através de centrais termoelétricas a carvão durante o período de estudo, 2015 a 2018, inclusive, e a sua ocupação percentual da área de Portugal continental [R.27].*

|                                     | Ano   |       |       |       |       |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                     | 2015  | 2016  | 2017  | 2018  | Média |
| Área total (km <sup>2</sup> )       | 2,61  | 2,61  | 2,61  | 2,61  | 2,61  |
| Percentagem de ocupação do país (%) | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 |

Tal como observado na Tabela 6.8, não existiu qualquer variação na área total ocupada devido a não terem sido contruídas novas centrais durante o período de estudo. Em termos percentuais, a área do país ocupada por este tipo de centrais é bastante baixa, 0,003% da área de Portugal continental, sendo que esta, no fim do período estudado, equivalente a 365 campos de futebol com dimensões de 105 × 68 m.

### 6.7 Erro associado à área ocupada

De modo a calcular o erro associado aos valores de área ocupada por centrais termoelétricas a carvão, foram recolhidos valores referentes às áreas ocupadas pelas duas centrais termoelétricas a carvão. Estes valores estão presentes nas declarações ambientais da EDP e em documentos AIA. Estas áreas permitem a análise da totalidade da área geográfica vetorizada. O erro associado a esta vetorização está representado na Tabela 6.9.

*Tabela 6.9: Comparação da área total obtida e área real ocupada pelas centrais termoelétricas a carvão, e o erro associado à vetorização feita nesta dissertação.*

|   | Ano  |      |      |      |       |
|---|------|------|------|------|-------|
|   | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | Média |
| Área total (km <sup>2</sup> )                       | 2,61 | 2,61 | 2,61 | 2,61 | 2,61  |
| Área real [R.13], [R.14], [R.58] (km <sup>2</sup> ) | 2,56 | 2,56 | 2,56 | 2,56 | 2,56  |
| Erro associado às áreas obtidas (%)                 | 1,67 | 1,67 | 1,67 | 1,67 | 1,67  |

Ao longo dos quatro anos analisados, o erro associado às áreas geográficas obtidas para este tipo de centrais foi muito reduzido, reforçando, assim, os resultados obtidos no subcapítulo seguinte.

### 6.8 Análise à área ocupada

O valor total da área ocupada por este tipo de centrais foi cruzado com os valores de potência instalada e de eletricidade produzida em cada ano de modo a obter informações relativas à utilização do espaço ocupado por estas centrais, obtendo dois resultados distintos para a utilização da área para cada ano, as razões área ocupada/potência instalada, e área ocupada/eletricidade produzida. As Figura 6.6 e Figura 6.7 são referentes às variações anuais destas duas razões ao longo do período em estudo. Em termos de valores médios para a razão área ocupada/potência instalada, e área ocupada/eletricidade produzida, foi obtido o valor 1 m<sup>2</sup>/kW e 2 × 10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>/kWh, respetivamente.

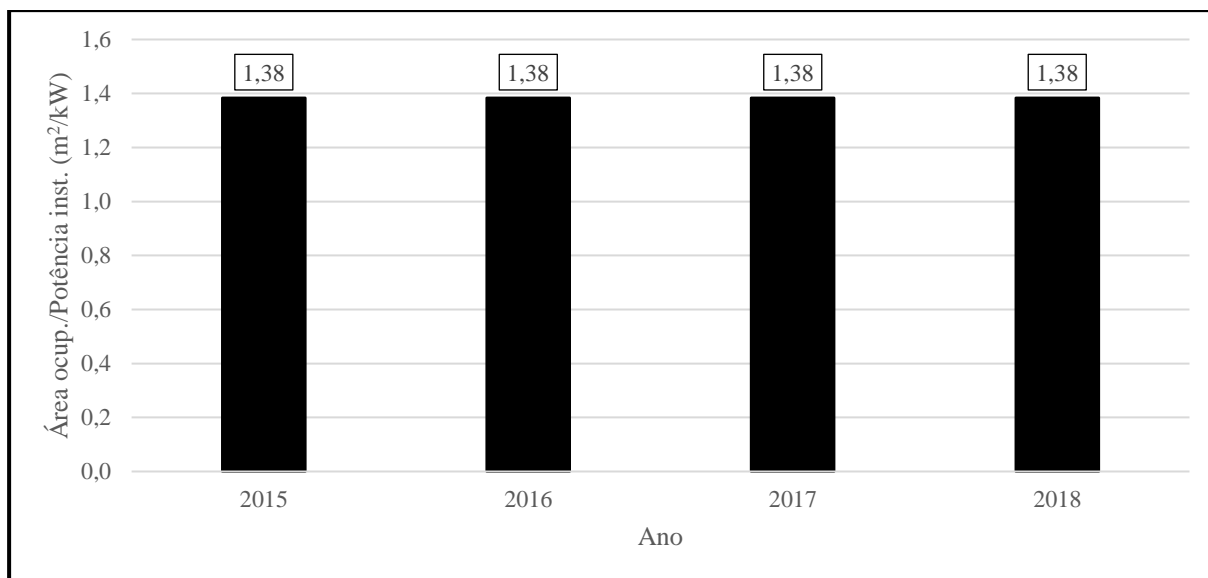


Figura 6.6: Gráfico da evolução anual da razão de área ocupada/potência instalada para centrais termoelétricas a carvão estudadas entre 2015 e 2018, inclusive.

Como era espectável, a Figura 6.6 demonstra que não existiram alterações no valor da razão área ocupada/potência instalada durante o período estudado devido ao facto de não terem sido instaladas novas centrais termoelétricas a carvão ao longo dos anos estudados. No capítulo dos resultados totais será comparada esta razão entre os diversos tipos de centrais, sendo utilizado o valor médio de todo o período estudado, que no caso desta tecnologia é equivalente ao valor associado a cada um dos anos estudados.

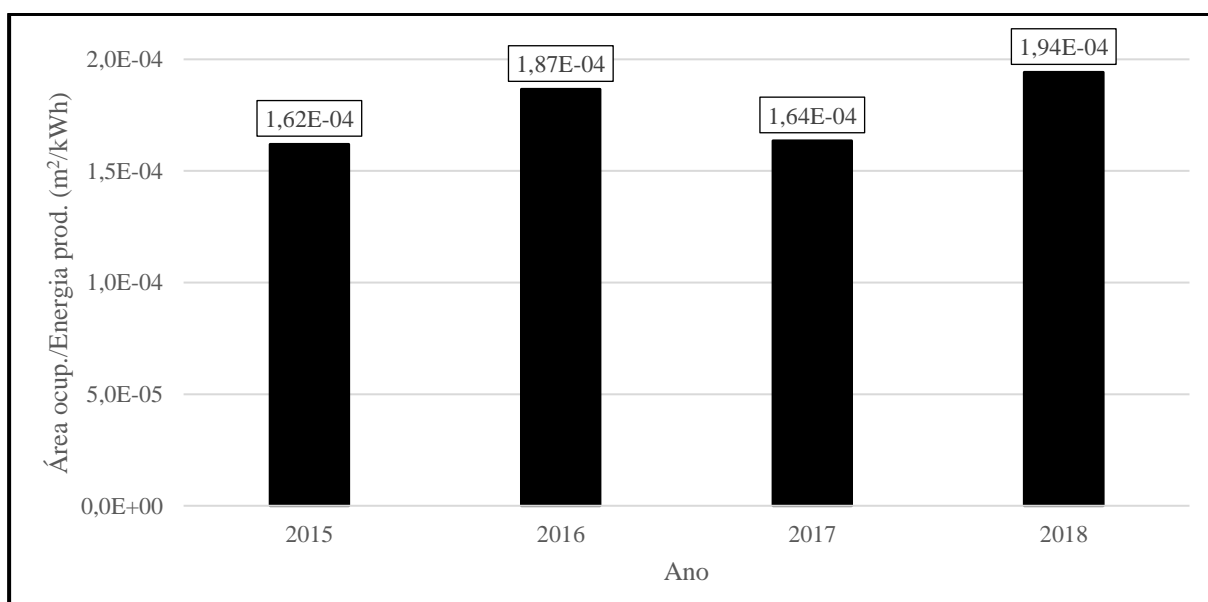


Figura 6.7: Gráfico da evolução anual da razão de área ocupada/eletricidade produzida para centrais termoelétricas a carvão estudadas entre 2015 e 2018, inclusive.

Na Figura 6.7 é demonstrada uma ligeira variação nos valores da razão área ocupada/eletricidade produzida, sendo que esta é apenas devida à variação na produção de energia elétrica requerida das centrais, visto que a área ocupada não variou entre 2015 e 2018. A variação desta razão tem forma contrária à apresentada nas centrais hidroelétricas com albufeira pois nos sistemas atuais, dada a escolha

entre estas duas tecnologias, é preferível produzir energia elétrica a partir de centrais hidroelétricas, diminuindo assim a emissão de gases com efeito de estufa na produção de eletricidade. De modo a combater esta variabilidade na comparação entre as diversas tecnologias, e a permitir uma análise de todo o período em estudo, o valor médio será utilizado para comparar os diferentes tipos de centrais no capítulo referente aos resultados totais. Os valores em si são baixos, o que se tornará mais evidente quando os vários tipos de centrais forem comparados. Estes devem-se à facilidade de armazenamento de carvão e à baixa necessidade de grandes instalações para produção de energia elétrica. Estes fatores quando agregados ao teor energético do carvão originam uma alta taxa de produção de eletricidade numa área pequena.



## 7. Centrais termoelétricas a gás natural

As centrais termoelétricas a gás natural correspondem a 5 das 528 centrais estudadas nesta dissertação sendo que, em média, estas produzem anualmente 14,07 TWh de eletricidade, o que corresponde a 26,34% da energia elétrica média produzida anualmente em Portugal continental entre 2015 e 2018. Deste valor médio de energia produzida, 63,58% tem origem conhecida, descrita nas declarações ambientais da EDP [R.15],[R.16], e 36,42% da energia teve a sua fonte assumida. Ao longo do período de tempo em estudo não houve alteração do valor de potência instalada pois todas as centrais em estudo foram construídas antes ou em 2015.

Na Figura 7.1 estão representadas todas as centrais termoelétricas a gás natural em funcionamento entre 2015 e 2018 que foram estudadas sobrepostas sobre o mapa de Portugal continental. Na Tabela 7.1, apresentada abaixo, está representada a variação do número de centrais termoelétricas a gás natural estudadas, a energia elétrica total produzida anualmente por todas as centrais deste tipo, representando, também, o total de energia elétrica produzida em Portugal continental, e as percentagens de energia com fonte conhecida e de fonte assumida, para cada um dos anos estudados.

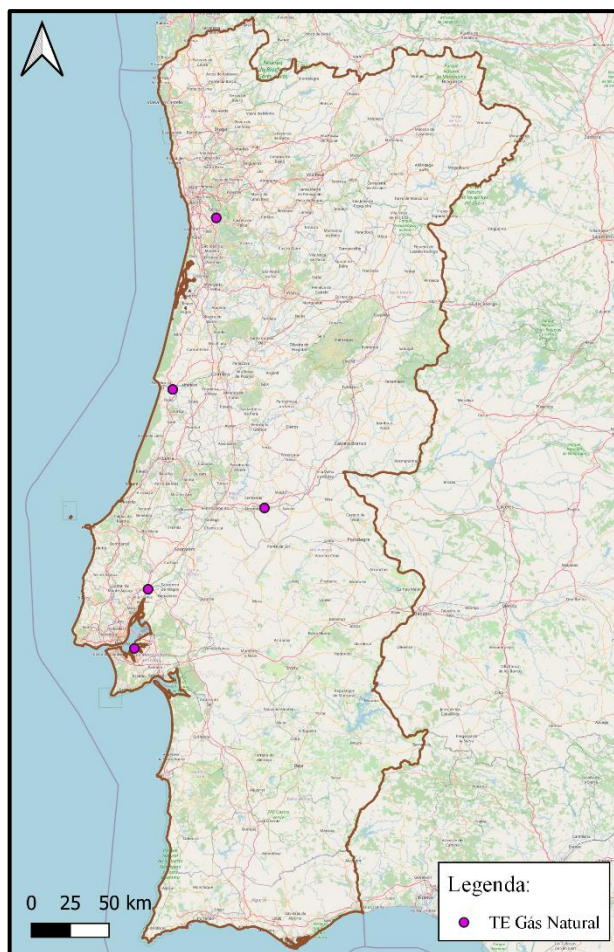


Figura 7.1: Mapa das centrais termoelétricas a gás natural estudadas em Portugal continental entre os anos de 2015 e 2018, inclusive. (Dados provenientes do projeto e2p<sup>[R.51]</sup>).

Tabela 7.1: Evolução do número de centrais, potência instalada e energia elétrica produzida no conjunto de centrais termoelétricas a gás natural estudadas em Portugal continental entre 2015 e 2018, inclusive, bem como as percentagens da energia elétrica total produzida com fonte conhecida e com fonte assumida.

|                                  | Ano     |         |         |         |
|----------------------------------|---------|---------|---------|---------|
|                                  | 2015    | 2016    | 2017    | 2018    |
| Número de centrais estudadas     | 5       | 5       | 5       | 5       |
| Potência instalada (MW)          | 3906,00 | 3906,00 | 3906,00 | 3906,00 |
| Energia elétrica produzida (TWh) | 10,37   | 12,30   | 18,44   | 15,18   |
| Percentagem conhecida (%)        | 51,57   | 60,97   | 74,09   | 67,68   |
| Percentagem assumida (%)         | 48,43   | 39,03   | 25,91   | 32,32   |



## 7.1 Emissões na fase de construção

Para o cálculo das emissões na fase de construção de centrais termoelétricas a gás natural foram utilizados 2 estudos diferentes, ambos referentes a centrais localizadas nos Estados Unidos da América. As Tabela 7.2 e Tabela 7.3, apresentadas abaixo, contêm os valores utilizados na construção de cada uma das centrais, extraídos dos estudos a que são referentes. Devido à diferença de valores de potência instalada nas 2 centrais presentes nos estudos, os valores destas tabelas estão expressos em termos de quantidade de massa de material ou energia necessária ajustada para um MW de potência instalada. No caso do betão foi sempre considerada a mesma mistura dividida em percentagens do peso total onde 84,9%, 5,4% e 9,8% correspondem a cascalho, água e cimento, respetivamente. Em termos do material denominado de aço, foi considerado que este era referente ao aço reforçado (rebar).

*Tabela 7.2: Listagem de material utilizado na construção de uma central com potência nominal de 200 MW e tempo de vida de 30 anos tal como descrito no relatório da NREL sobre o ciclo de vida de centrais termoelétricas a gás natural nos EUA [R.18].*

| Material                         | Quantidade (kg/MW) | Quantidade (MWh/MW) |
|----------------------------------|--------------------|---------------------|
| Cascalho                         | 4,15E+02           | -                   |
| Água                             | 2,64E+01           | -                   |
| Cimento                          | 4,79E+01           | -                   |
| Betão                            | 4,89E+02           | -                   |
| Aço                              | 1,55E+02           | -                   |
| Ferro                            | 2,04E+00           | -                   |
| Alumínio                         | 1,02E+00           | -                   |
| Eletricidade                     | -                  | 5,55E-02            |
| Gasóleo (Maquinas de construção) | -                  | 2,38E-01            |
| Gasóleo (Aquecimento)            | -                  | 2,38E-01            |

*Tabela 7.3: Listagem de material utilizado na construção de uma central termoelétrica a gás natural com potência nominal de 620 MW e tempo de vida de 30 anos tal como descrito no estudo relativo à análise do ciclo de vida da produção de eletricidade por via de várias fontes energéticas nos EUA [R.32].*

| Material                         | Quantidade (kg/MW) | Quantidade (MWh/MW) |
|----------------------------------|--------------------|---------------------|
| Cascalho                         | 4,06E+04           | -                   |
| Água                             | 2,58E+03           | -                   |
| Cimento                          | 4,69E+03           | -                   |
| Betão                            | 4,78E+04           | -                   |
| Alumínio                         | 2,90E+00           | -                   |
| Cromo                            | 5,16E-01           | -                   |
| Cobre                            | 6,45E+00           | -                   |
| Ferro                            | 1,18E+02           | -                   |
| Aço com carbono                  | 2,18E+02           | -                   |
| Aço de alta liga                 | 2,24E+03           | -                   |
| Manganés                         | 2,74E+01           | -                   |
| Molibdénio                       | 2,74E-01           | -                   |
| Plástico                         | 2,42E+01           | -                   |
| Silício                          | 6,13E+00           | -                   |
| Vanádio                          | 8,23E-01           | -                   |
| Eletricidade                     | -                  | 5,55E-02            |
| Gasóleo (Máquinas de construção) | -                  | 2,38E-01            |
| Gasóleo (Aquecimento)            | -                  | 2,38E-01            |

Devido à variação dos materiais considerados em ambos os estudos bem como das quantidades utilizadas do mesmo material, foram feitos 2 estudos diferentes das emissões na fase de construção das centrais termoelétricas a gás natural de modo a obter um valor mais próximo da realidade. Para um cálculo mais pormenorizado das emissões reais foram tidas em conta as emissões indiretas e diretas de cada material em estudo e, para isso, foi necessário analisar o propósito do uso de cada material. Para

as emissões diretas, foi ponderado se o uso deste material emite gases com efeito de estufa para além dos já contabilizados nas emissões indiretas. No caso destes 2 estudos, apenas o gasóleo utilizado para operar as máquinas de construção e para aquecimento possui emissões diretas. Ao conhecer o valor de emissões médias causadas pela fase de construção no período de tempo em estudo, é possível agrupar posteriormente este valor ao valor das emissões na fase de operação para cada ano em estudo e analisar o verdadeiro impacto ambiental que este tipo de central tem anualmente.

De modo a fazer uma análise percentual do impacto de cada material na fase de construção deste tipo de central, foi utilizado o valor médio dos totais obtidos e o estudo com maior número de materiais utilizados. Obtida a percentagem do impacto que cada material tem no valor total do estudo com o maior número de materiais utilizados, foi possível subdividir as emissões totais médias de gases com efeito de estufa na fase de construção pelos diversos materiais. A Figura 7.2 representa esta divisão, sendo a média dos totais de cada estudo equivalente a  $9 \times 10^2 \text{ t CO}_{2eq}/ano$ .

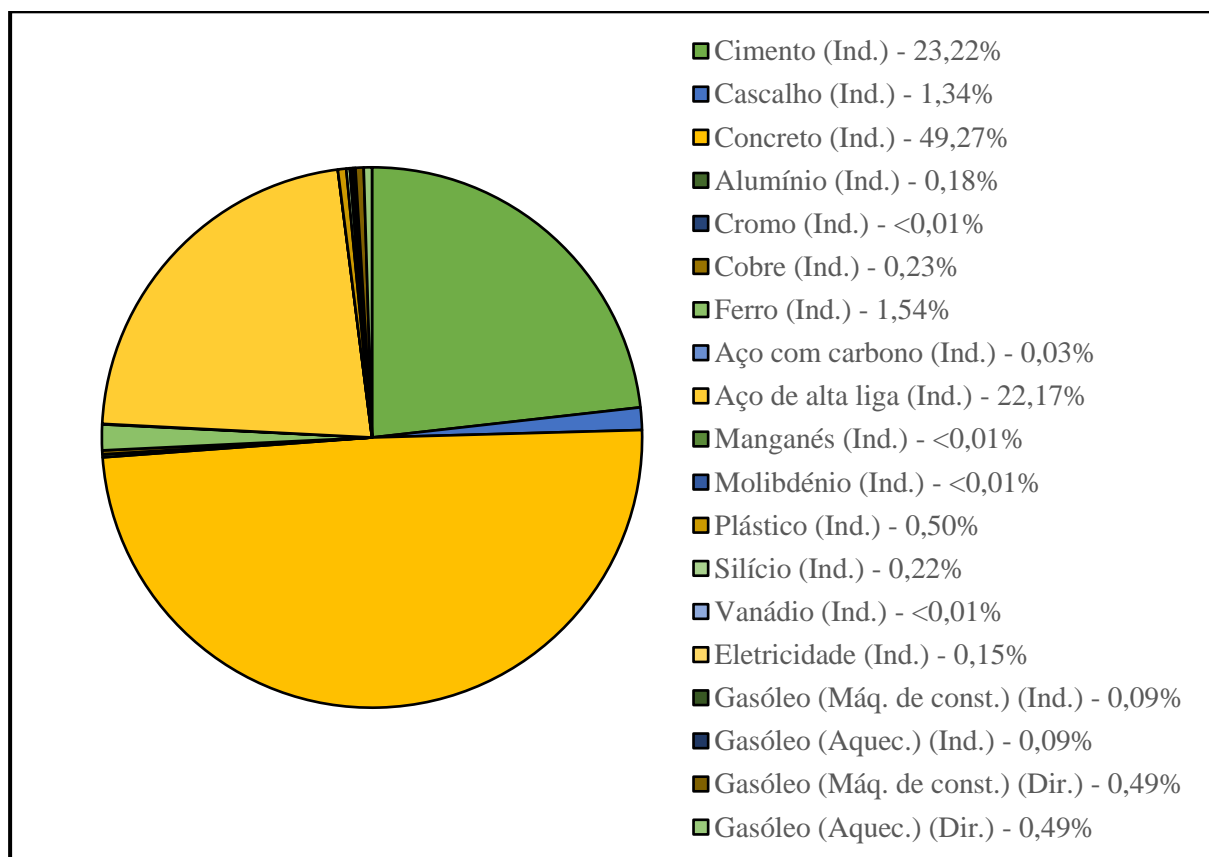


Figura 7.2: Divisão das diversas fontes de emissão na fase de construção de uma central termoelétrica a gás natural.

Analisando a Figura 7.2 observou-se que as emissões referentes à produção de betão representam cerca de metade das emissões totais nesta fase do ciclo de vida das centrais termoelétricas a gás natural. Para além dessas, tanto as emissões referentes à produção de cimento e de aço de alta liga representam fatias importantes das emissões desta fase. Aglomerando as quantidades de gases com efeito de estufa emitidos para a produção das quantidades necessárias destes 3 materiais, obtém-se quase a totalidade das emissões associadas à fase de construção.

## 7.2 Emissões na fase de construção

Semelhantemente à análise da fase de operação das centrais termoelétricas a carvão, a análise feita a esta fase nas centrais termoelétricas a gás natural foi conseguida a partir da listagem dos consumos presentes nas declarações ambientais da EDP <sup>[R.15], [R.16]</sup>. Devido ao facto de parte das centrais estudadas nesta dissertação não terem valores de consumo conhecidos, foram utilizados fatores de conversão baseados na relação entre o consumo e a energia elétrica produzida das centrais onde esses valores eram conhecidos. Estes fatores de relação foram obtidos a partir da média dos valores conhecidos e são específicos para cada consumo e para cada ano estudado. A lista completa de consumos está apresentada na Tabela 7.4, bem como os fatores de conversão anuais associados a cada consumo.

*Tabela 7.4: Lista de fatores de conversão utilizados, calculados a partir dos consumos analisados para as centrais termoelétricas a gás natural presentes nas declarações ambientais da EDP <sup>[R.15], [R.16]</sup>.*

| Consumo                        | Fator de conversão (/GWh <sub>prod.</sub> ) |          |          |          |
|--------------------------------|---|----------|----------|----------|
|                                | 2015  | 2016     | 2017     | 2018     |
| Eletricidade (GWh)             | 4,14E-02                                    | 3,43E-02 | 3,01E-02 | 3,37E-02 |
| Gás natural (Nm <sup>3</sup> ) | 1,74E+05                                    | 1,73E+05 | 1,70E+05 | 1,68E+05 |
| Gasóleo (kg)                   | 4,35E+00                                    | 1,04E+01 | 3,16E+00 | 2,21E+00 |
| Ácido Clorídrico (kg)          | 1,69E+02                                    | 1,76E+02 | 1,55E+02 | 1,80E+02 |
| Hipoclorito de Sódio (kg)      | 2,87E+02                                    | 2,32E+02 | 1,76E+02 | 1,71E+02 |
| Amónia (kg)                    | 8,10E+00                                    | 7,31E+00 | 5,44E+00 | 3,25E+00 |
| Hidróxido de Sódio (kg)        | 3,29E+01                                    | 2,48E+01 | 2,11E+01 | 2,41E+01 |

Ao analisar a Tabela 7.4 é possível observar que existe alguma variabilidade nos valores dos fatores de conversão de ano para ano. Tal como na fase de construção, estes consumos foram analisados em termos de emissões indiretas e diretas. Neste caso os consumos que possuem também emissões diretas são o gás natural e o gasóleo, que emitem gases com efeito de estufa quando queimados no processo de produção de eletricidade.

Numa análise percentual do impacto de cada consumo nas emissões totais de gases com efeito de estufa na fase de operação de centrais termoelétricas a gás natural, sendo que apenas foram utilizadas as declarações ambientais da EDP <sup>[R.15],[R.16]</sup> para cálculo das emissões em fase de operação, foram utilizados valores médios das emissões indiretas e diretas para cada consumo e, também, do total das emissões provenientes da fase de operação no período entre 2015 e 2018. Este valor médio é de  $6 \times 10^6 \text{ t CO}_{2eq}/ano$  e a Figura 7.3 representa a subdivisão deste pelas diferentes percentagens referentes aos impactos dos consumos médios desta fase.

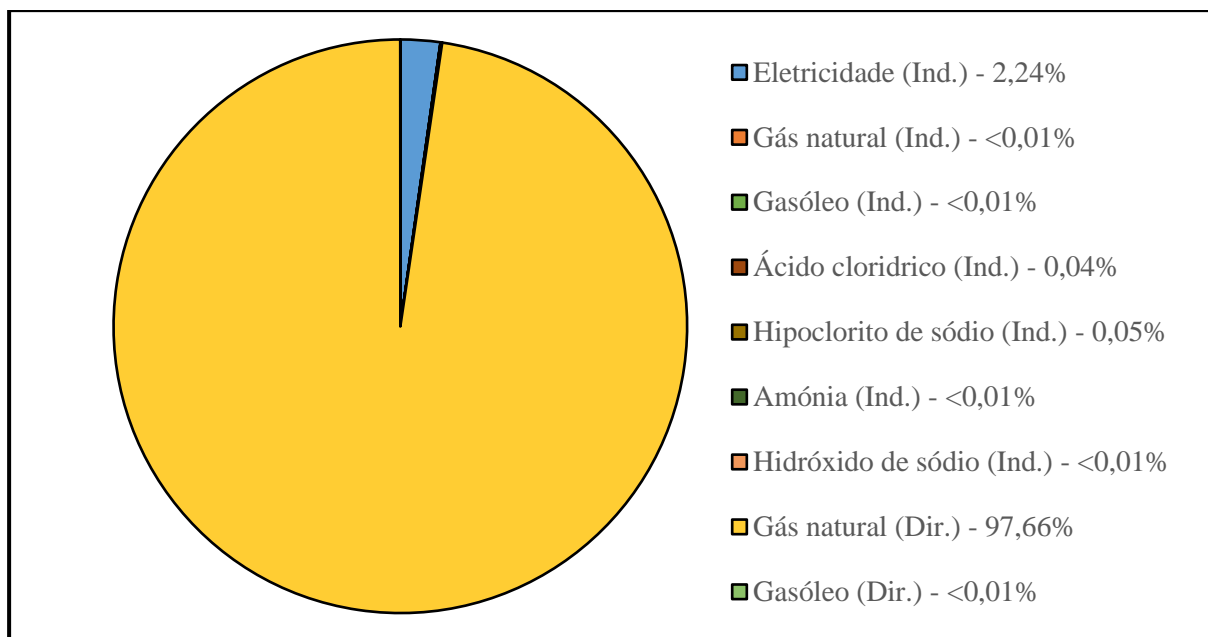


Figura 7.3: Divisão das diversas fontes de emissão na fase de operação de uma central termoelétrica a gás natural.

Analisando a Figura 7.3 é possível observar que as emissões diretas da queima de gás natural correspondem praticamente à totalidade das emissões na fase de operação sendo que todas as outras têm impactos insignificantes no valor total final. As emissões associadas à eletricidade estão diretamente relacionadas com o *mix* de geração de energia elétrica existente em Portugal continental no período de tempo estudado, sendo que a utilização de tipos de tecnologia de produção de energia elétrica com valores superiores ou inferiores de gases com efeito de estufa emitidos em comparação com os utilizados no *mix* de geração de energia elétrica existente terá influência nas emissões libertadas pelo consumo de eletricidade. Mesmo assim, devido às emissões diretas associadas ao gás natural constituírem 98% das emissões totais, é possível desprezar o resto das emissões desta fase.

### 7.3 Análise do perfil de emissões anuais

Com base no valor total médio das emissões anuais na fase de construção obtido anteriormente e com o valor total anual de emissões na fase de operação para cada ano estudado é possível construir a Figura 7.4. Esta figura compara não só as emissões em fase de construção e operação, mas também a variação do total de ambas ao longo do período em estudo, sendo que é, também, apresentada uma barra de erro que demonstram a variabilidade do valor das emissões totais da fase de construção entre o valor mínimo e máximo obtido a partir dos 2 estudos utilizados.

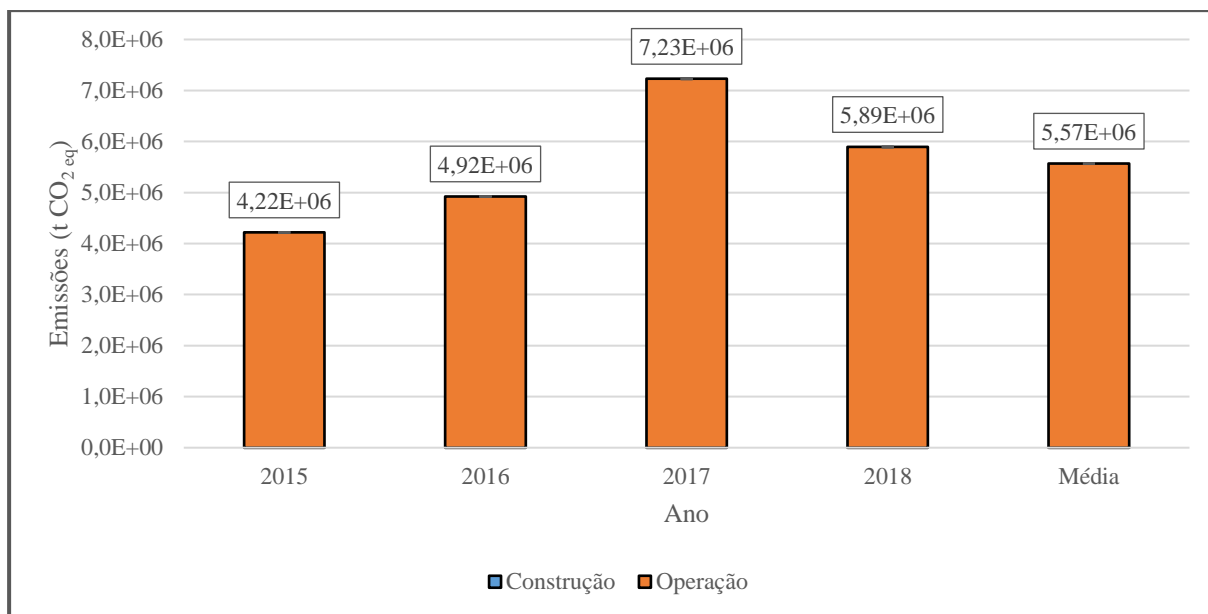


Figura 7.4: Gráfico da variação anual das emissões de gases com efeito de estufa nas fases de construção e operação, e, por sua vez, das emissões totais, referentes às centrais termoelétricas a gás natural em funcionamento em Portugal continental entre 2015 e 2018, inclusive, e a média destes valores. No gráfico também encontra-se representado o erro presente nos cálculos referentes a estas centrais, efetuados nesta dissertação.

É possível observar uma grande diferença entre os valores de emissões na fase de construção e de operação em todos os anos estudados, sendo que o valor das primeiras tem uma ordem de grandeza muito inferior em comparação com o valor das segundas e, assim, é possível concluir que a influência das emissões na fase de construção nas emissões totais anuais deste tipo de centrais é praticamente inexistente. Em termos médios, a fase de operação constitui 99,98% das emissões totais. A barra de erro existente na mesma figura demonstra, novamente, o pequeno papel das emissões na fase de construção nas emissões totais em estudo nesta dissertação pois esta barra está apenas associada às emissões dessa fase e a sua variação não influencia de maneira significativa a quantidade total de gases com efeito de estufa que são emitidos anualmente.

#### 7.4 Emissões diretas para a produção de eletricidade

No caso das emissões diretas para produção de eletricidade, de todos os consumos referidos na Tabela 7.4 foram apenas tidas em conta as emissões diretas do consumo do gás natural, pois este é a matéria-prima principal utilizada para a produção de eletricidade neste tipo de central. O valor médio das emissões diretas associadas à queima de gás natural foi calculado como sendo equivalente a  $5 \times 10^6 \text{ t CO}_{2eq}/ano$ .

#### 7.5 Fator de emissão

Com o conhecimento das emissões totais, obtidas pela junção de todas as emissões presentes nas duas fases estudadas, e das emissões diretas da queima de gás natural na fase de operação, foi obtido um valor para o fator de emissão de gases com efeito de estufa em função da energia elétrica produzida pelas centrais termoelétricas a gás natural em Portugal continental não só para cada ano em estudo mas também uma média destes valores, estando estes apresentados na Tabela 7.5.

Tabela 7.5: Fatores de emissão direta e total médio calculado anualmente para centrais termoelétricas a gás natural e a média dos seus valores.

| Fator de emissão médio<br>( $g\ CO_{2eq}/kWh$ ) | Ano    |        |        |        |        |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|
|   | 2015   | 2016   | 2017   | 2018   | Média  |
| Direta  | 394,28 | 391,53 | 383,86 | 379,10 | 386,17 |
| Total   | 406,77 | 400,23 | 391,98 | 388,19 | 395,49 |

É possível observar que na tabela que o fator de emissão direta é muito próximo do valor total de emissões calculadas pois as emissões da fase de operação constituem quase a totalidade das emissões totais e das emissões dessa fase, as associadas à queima de gás natural ocupam cerca de 98% do total. Assim, tal como esperado, em média, o fator de emissão direta corresponde a 98% do fator de emissão total.

Com a Tabela 7.5 foi, posteriormente, possível calcular o fator de emissão real do *mix* de geração de energia elétrica de Portugal continental e o fator de emissão direta do mesmo *mix*, sendo que este último aproxima-se mais dos valores normalmente tabelados. Esta comparação de fatores de emissão será apresentada no capítulo referente aos resultados totais.

## 7.6 Área ocupada

Com base na lista de centrais e com o auxílio de mapas projetados, em ambiente SIG, foram vetorizados polígonos representativos da área geográfica de cada central. No caso das centrais termoelétricas a gás natural foram tidos em conta as estradas de acesso, ou parte delas, mas, em alguns casos, parte das instalações eram partilhadas com centrais termoelétricas a carvão construídas no mesmo complexo industrial. Nesses casos toda a área dessas instalações foi considerada como fazendo parte das centrais termoelétricas a carvão e para as centrais a gás natural foram só consideradas as instalações unicamente pertencentes a elas. A Figura 7.5 mostra um exemplo dos polígonos desenhados.



Figura 7.5: Exemplo de área de uma central termoelétrica a gás natural mapeada. Neste exemplo é observável a área correspondente à central de Lares.

A partir desses polígonos foi determinado o valor relativo à área total ocupada por este tipo de centrais. A Tabela 7.6 apresenta a variação desses valores ao longo do período de tempo estudado e a correspondente percentagem da área de Portugal continental ocupada associada ao mesmo tipo de centrais.

*Tabela 7.6: Evolução da área ocupada para produção de energia elétrica através de centrais termoelétricas a gás natural durante o período de estudo, 2015 a 2018, inclusive, e a sua ocupação percentual da área de Portugal continental [R.27].*

|                                     | Ano    |        |        |        |        |
|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                     | 2015   | 2016   | 2017   | 2018   | Média  |
| Área total (km <sup>2</sup> )       | 0,31   | 0,31   | 0,31   | 0,31   | 0,31   |
| Percentagem de ocupação do país (%) | 0,0003 | 0,0003 | 0,0003 | 0,0003 | 0,0003 |

Tal como observado na Tabela 7.6, não existiu qualquer variação da área total ocupada devido a não terem sido contruídas novas centrais durante o período de estudo. Em termos percentuais, a área do país ocupada por centrais termoelétricas a gás natural é bastante baixa, 0,0003% da área de Portugal continental, sendo que esta, no fim do período estudado, equivalente a 43 campos de futebol com dimensões de 105 × 68 m.

### 7.7 Erro associado à área ocupada

De modo a calcular o erro associado aos valores de área ocupada por centrais termoelétricas a gás natural, foram recolhidos valores referentes às áreas ocupadas pelas diversas centrais consideradas neste estudo. Os valores utilizados estão presentes nas declarações ambientais da EDP e em documentos AIA. Estes permitiram a análise de todas as centrais consideradas, sendo o erro associado à vectorização destas representado na Tabela 7.7.

*Tabela 7.7: Comparação da área total obtida e área real ocupada pelas centrais termoelétricas a carvão, e o erro associado à vectorização feita nesta dissertação.*

|   | Ano  |      |      |      |       |
|---|------|------|------|------|-------|
|   | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | Média |
| Área total (km <sup>2</sup> )                           | 0,31 | 0,31 | 0,31 | 0,31 | 0,31  |
| Área real [R.15][R.16][R.58], [R.61] (km <sup>2</sup> ) | 0,28 | 0,28 | 0,28 | 0,28 | 0,28  |
| Erro associado às áreas obtidas (%)                     | 9,18 | 9,18 | 9,18 | 9,18 | 9,18  |

Ao longo dos quatro anos analisados, o erro associado às áreas geográficas obtidas para este tipo de centrais já é notável mas este facto pode ser explicado pela pequena área ocupada por este tipo de centrais, levando a que um pequeno desvio na vectorização das mesmas origine um valor elevado do erro percentual.

### 7.8 Análise à área ocupada

O valor total da área ocupada por este tipo de centrais foi cruzado com os valores de potência instalada e de eletricidade produzida em cada ano, obtendo-se valores para as razões área ocupada/potência instalada, e área ocupada/eletricidade produzida, indicadores de estudo da área geográfica ocupada utilizados neste estudo. As Figura 7.6 e Figura 7.7 são referentes às variações anuais destes ao longo do

período estudado. Em termos de valores médios para a razão área ocupada/potência instalada, e área ocupada/eletricidade produzida, foram obtidos os valores  $0,1 \text{ m}^2/\text{kW}$  e  $2 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{kWh}$ , respetivamente.

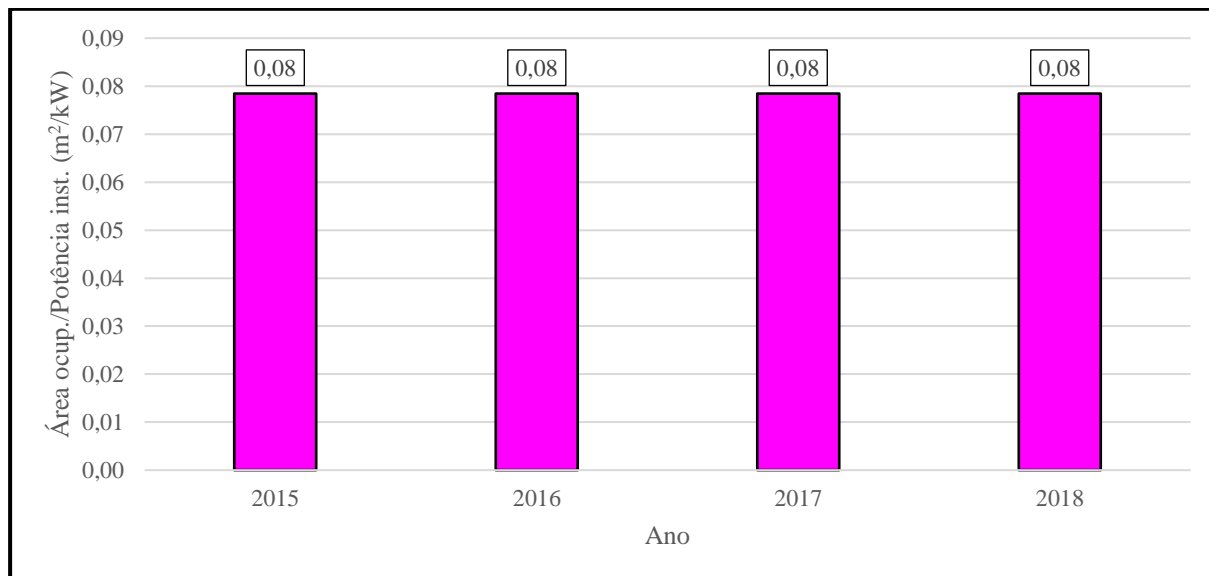


Figura 7.6: Gráfico da evolução anual da razão de área ocupada por potência instalada para centrais termoelétricas a gás natural estudadas entre 2015 e 2018, inclusive.

Como era espectável, na Figura 7.6 não existem alterações no valor da razão área ocupada/potência instalada durante o período estudado devido não facto de não terem sido instaladas novas centrais termoelétricas a gás natural dentro do período estudado. No capítulo dos resultados totais será comparada esta razão entre os diversos tipos de centrais, sendo utilizado o valor médio do período em estudo, que no caso desta tecnologia é equivalente ao valor associado a cada um dos anos estudados.

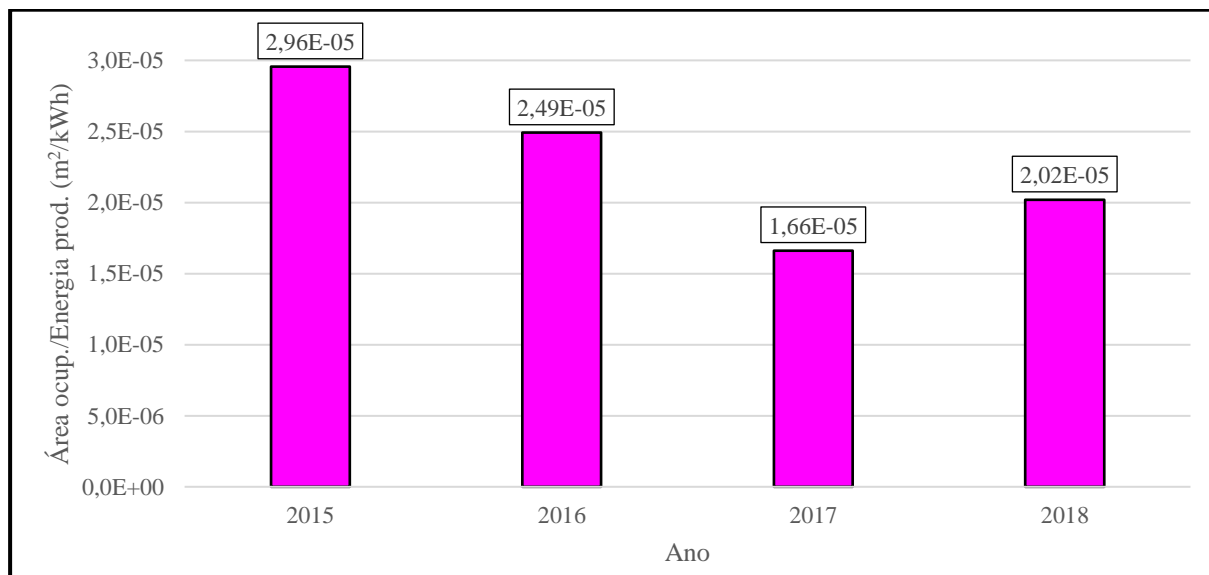


Figura 7.7: Gráfico da evolução anual da razão de área ocupada por eletricidade produzida para centrais termoelétricas a gás natural estudadas entre 2015 e 2018, inclusive.

Na Figura 7.7 é demonstrada uma variação nos valores da razão área ocupada/eletricidade produzida, sendo que esta é apenas devida à variação na produção de energia elétrica requerida das centrais, visto que a área ocupada não variou entre 2015 e 2018. A diminuição desta razão em 2017 é devida a este ano



ter sido extremamente seco, o que levou a uma diminuição na eletricidade produzida por centrais hidroelétricas que teve de ser compensada por energia elétrica produzida por centrais termoelétricas. Em 2018, a tendência de diminuição destes valores retornou a valores mais normais. De modo a combater a variabilidade anual desta razão e de modo a permitir uma análise mais holística do período em estudo, a média dos valores anuais será utilizada no capítulo relativo aos resultados finais para comparar os diversos tipos de centrais. Os valores em si são elevados, o que se tornará mais evidente quando os vários tipos de centrais forem comparados. Estes valores devem-se à facilidade de armazenamento de gás natural e à baixa necessidade de grandes instalações para produção de eletricidade, para além disso, a utilização de infraestruturas de centrais vizinhas também têm um impacto na área ocupada o que por sua vez faz com o valor da razão área ocupada/eletricidade produzida seja mais baixo.

## 8. Centrais eólicas

As centrais eólicas correspondem a 233 das 528 centrais estudadas. Em média, estas centrais produzem anualmente 11,96 TWh de eletricidade, o que corresponde a 22,39% da energia elétrica média produzida anualmente, no período entre 2015 e 2018, em Portugal continental. Devido a este tipo de centrais não estar nas declarações ambientais da EDP, foi assumida a fonte de 100% do valor médio de energia produzida. Ao longo do período de tempo em estudo houve alteração do valor de potência instalada pois várias centrais em estudo foram construídas após 2015. Do total estudado, 2 centrais foram construídas em 2016 e outras 2 em 2018.

Na Figura 8.1 estão representadas todas as centrais eólicas, em funcionamento entre 2015 e 2018, que foram estudadas sobrepostas sobre o mapa de Portugal continental. Na Tabela 8.1 está representada a variação do número de centrais eólicas estudadas, a energia elétrica total produzida anualmente por todas as centrais deste tipo, que representa, igualmente, o total de eletricidade produzida em Portugal continental, e as percentagens de energia com fonte conhecida e de fonte assumida, para cada um dos anos estudados.

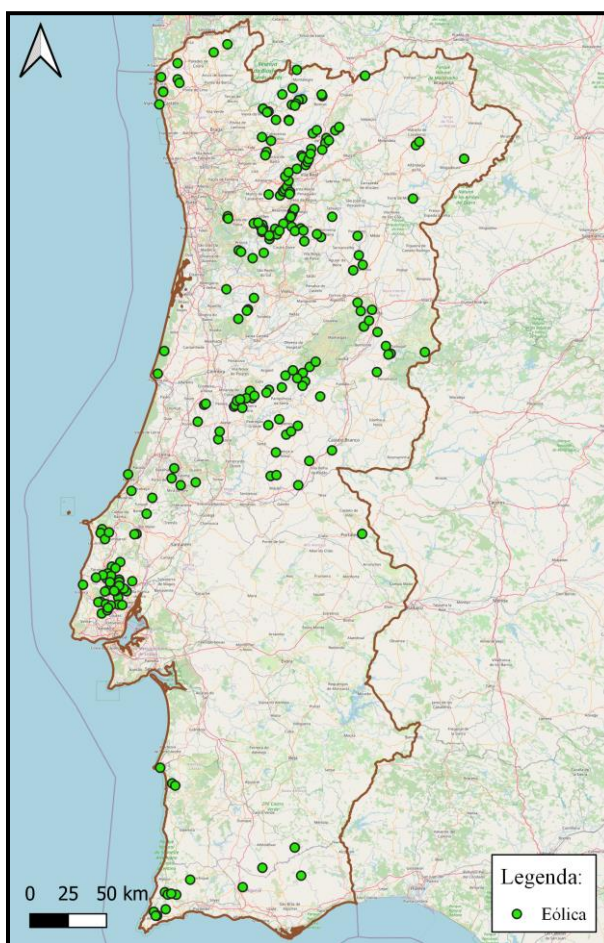


Figura 8.1: Mapa das centrais eólicas estudadas em Portugal continental entre os anos de 2015 e 2018, inclusive. (Dados provenientes do projeto e2p<sup>[R.5]</sup>).

Tabela 8.1: Evolução do número de centrais, potência instalada e energia elétrica produzida no conjunto de centrais eólicas estudadas em Portugal continental entre 2015 e 2018, inclusive, bem como as percentagens da energia elétrica total produzida com fonte conhecida e com fonte assumida.

|                                  | Ano     |         |         |         |
|----------------------------------|---------|---------|---------|---------|
|                                  | 2015    | 2016    | 2017    | 2018    |
| Número de centrais estudadas     | 229     | 231     | 231     | 233     |
| Potência instalada (MW)          | 5092,61 | 5270,41 | 5270,41 | 5319,71 |
| Energia elétrica produzida (TWh) | 11,33   | 12,19   | 11,97   | 12,35   |
| Percentagem conhecida (%)        | 0       | 0       | 0       | 0       |
| Percentagem assumida (%)         | 100     | 100     | 100     | 100     |

## 8.1 Emissões na fase de construção

Para o cálculo das emissões na fase de construção para centrais eólicas foram utilizados 4 estudos diferentes, referentes a estudos feitos por empresas como a Vestas ou a centrais localizadas em países como o Brasil. As Tabela 8.2, Tabela 8.3, Tabela 8.4 e Tabela 8.5 contêm os valores utilizados na construção de cada uma das centrais referidas nos estudos. Devido à diferença nos valores de potência instaladas dos parque eólicos nos estudos, os valores apresentados nas tabelas foram ajustados para valores de quantidade de massa de material ou energia necessária para um MW de potência instalada. No caso do betão foi sempre considerada a mesma mistura dividida em percentagens do peso total onde 84,9%, 5,4% e 9,8% correspondem a cascalho, água e cimento, respetivamente. Em termos do material denominado de aço, foi considerado que este era referente ao aço reforçado (rebar).

*Tabela 8.2: Listagem de material utilizado para construção de uma central com potência nominal de 21 MW e tempo de vida de 20 anos tal como descrito no projeto onde são utilizadas turbinas eólicas de aço no estudo de análise ao ciclo de vida de centrais eólicas onshore no Brasil [R.33].*

| Material          | Quantidade (kg/MW) |
|-------------------|--------------------|
| Cimento           | 4,94E+04           |
| Cascalho          | 4,28E+05           |
| Água              | 2,72E+04           |
| Betão             | 5,04E+05           |
| Fibra de vidro    | 9,00E+03           |
| Epóxi             | 4,13E+03           |
| Aço de alta liga  | 6,74E+03           |
| Tinta             | 7,88E+02           |
| Ferro             | 1,78E+04           |
| Aço de baixa liga | 9,43E+03           |
| Aço inoxidável    | 4,73E+03           |
| Cobre             | 2,16E+03           |
| Plástico          | 1,82E+03           |
| Alumínio          | 2,38E+03           |
| Óleo lubrificante | 8,20E+02           |
| Aço com carbono   | 1,04E+05           |
| Aço reforçado     | 1,50E+04           |
| Papel             | 6,00E+01           |

*Tabela 8.3: Listagem de material utilizado para construção de uma central com potência nominal de 21 MW e tempo de vida de 20 anos tal como descrito no projeto onde são utilizadas turbinas eólicas de betão no estudo de análise ao ciclo de vida de centrais eólicas onshore no Brasil [R.33].*

| Material          | Quantidade (kg/MW) |
|-------------------|--------------------|
| Cimento           | 9,50E+04           |
| Cascalho          | 8,23E+05           |
| Água              | 5,23E+04           |
| Betão             | 9,69E+05           |
| Fibra de vidro    | 9,00E+03           |
| Epóxi             | 4,13E+03           |
| Aço de alta liga  | 5,14E+04           |
| Tinta             | 3,25E+02           |
| Ferro             | 1,78E+04           |
| Aço de baixa liga | 9,43E+03           |
| Aço inoxidável    | 4,73E+03           |
| Cobre             | 2,16E+03           |
| Plástico          | 1,82E+03           |
| Alumínio          | 2,38E+03           |
| Óleo lubrificante | 8,20E+02           |
| Aço com carbono   | 3,00E+02           |
| Aço reforçado     | 1,50E+04           |
| Papel             | 6,00E+01           |

Tabela 8.4: Listagem de material utilizado na construção de uma central eólica com potência nominal de 2,5 MW e tempo de vida de 20 anos tal como descrito no estudo relativo à análise do ciclo de vida de centrais eólicas onshore e offshore teóricas, baseadas em dados da Siemens Wind Power [R.34].

| Material       | Quantidade (kg/MW) |
|----------------|--------------------|
| Cimento        | 1,02E+06           |
| Cascalho       | 8,83E+06           |
| Água           | 5,61E+05           |
| Betão          | 1,04E+07           |
| Aço            | 2,93E+06           |
| Ferro          | 2,57E+05           |
| Epóxi          | 1,71E+05           |
| Fibra de vidro | 1,43E+05           |
| Plástico       | 1,14E+05           |
| Alumínio       | 1,00E+05           |
| Cobre          | 1,00E+05           |
| Madeira        | 2,86E+04           |

Tabela 8.5: Listagem de material utilizado na construção de uma central eólica com potência nominal de 50 MW e tempo de vida de 20 anos tal como descrito no estudo de análise do ciclo de vida da produção de eletricidade por uma central eólica onshore, conduzido pela Vestas [R.35].

| Material                | Quantidade (kg/MW) |
|-------------------------|--------------------|
| Cimento                 | 4,48E+04           |
| Cascalho                | 3,88E+05           |
| Água                    | 2,47E+04           |
| Betão                   | 4,57E+05           |
| Aço de baixa liga       | 9,98E+04           |
| Ferro                   | 1,33E+04           |
| Aço cromado             | 1,74E+04           |
| Polímero                | 1,36E+04           |
| Cerâmica                | 3,70E+03           |
| Vidro                   | 3,70E+03           |
| Alumínio                | 5,10E+03           |
| Cobre                   | 1,74E+03           |
| Íman                    | 6,00E+01           |
| Óleo lubrificante       | 6,60E+02           |
| Líquido de refrigeração | 8,00E+01           |

Devido à variação dos materiais considerados nos 4 estudos bem como das quantidades utilizadas do mesmo material, foi necessário produzir 4 estudos diferentes das emissões na fase de construção das centrais eólicas de modo a obter um valor mais próximo da realidade. Para que nestes estudos fossem calculadas as emissões reais foi tido em conta as emissões indiretas e diretas de cada material em estudo e, para isso, foi necessário analisar o propósito da utilização de cada material. No caso destes 4 estudos, nenhum dos materiais possui um uso que proporcione emissões diretas, assim, o total de emissões na fase de construção em cada um dos estudos é diretamente derivada das emissões indiretas de cada material usado. Conhecendo o valor total médio da emissão de gases com efeito de estufa libertados na fase de construção por ano é possível agrupar, posteriormente, este ao valor das emissões na fase de operação para cada ano em estudo e analisar o verdadeiro impacto ambiental que este tipo de central tem anualmente.

Numa análise percentual do impacto de cada material na fase de construção deste tipo de central, foi utilizado o valor médio dos totais obtidos para esta fase, e o estudo com maior número de materiais utilizados. Foi utilizada a parte do estudo sobre centrais eólicas no Brasil referente à turbina de betão [R.33] uma vez que este tipo de turbinas, com um valor total de emissões anuais de  $CO_{2eq}$  de  $1 \times 10^5 t CO_{2eq}/ano$ , possuem um valor mais próximo do valor médio dos estudos, a apresentar posteriormente, do que as turbinas de aço, com emissões equivalentes a  $8 \times 10^4 t CO_{2eq}/ano$ . A percentagem do impacto que cada material tem no valor total do estudo com o maior número de materiais utilizados foi utilizada para subdividir as emissões totais médias dos quatro estudos analisados.

Esta divisão está representada na Figura 8.2, e o valor médio final obtido, considerado o mais realista, é equivalente a  $8 \times 10^5 \text{ t CO}_{2eq}/\text{ano}$ .

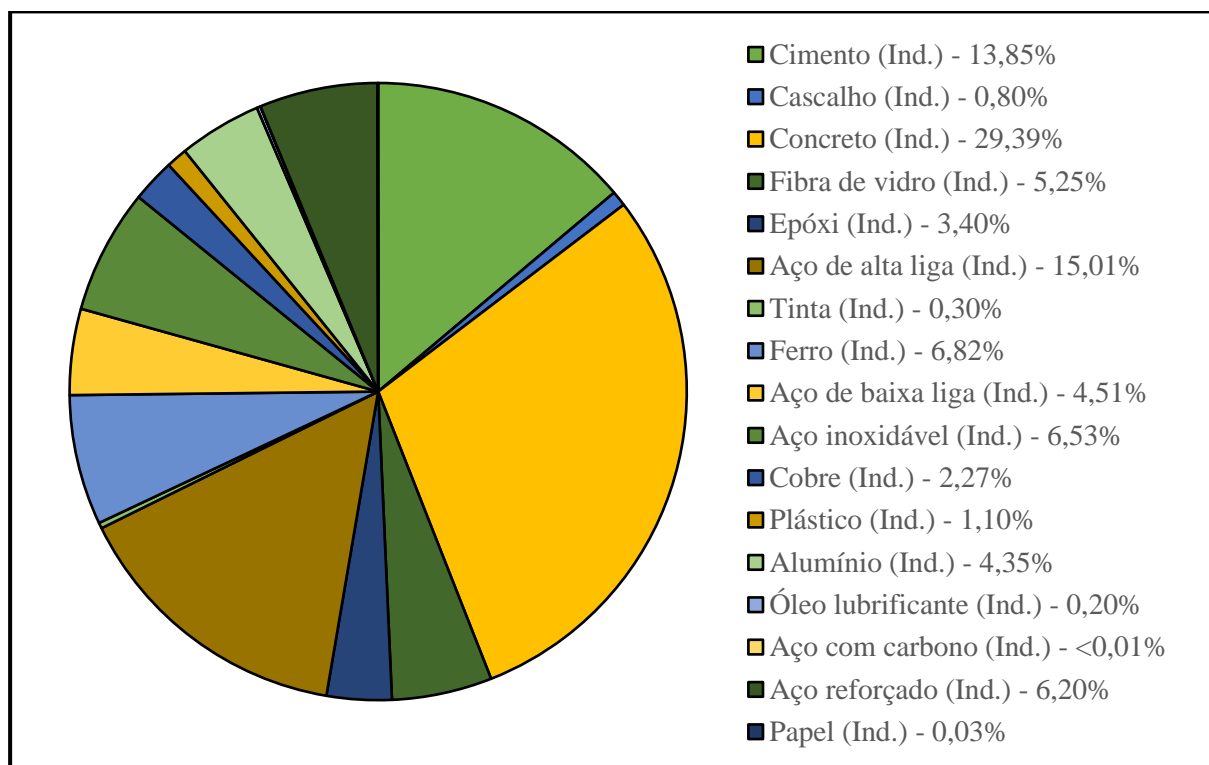


Figura 8.2: Divisão das diversas fontes de emissão na fase de construção de uma central eólica.

A partir da Figura 8.2 observou-se que as emissões referentes à fase de construção são repartidas de modo relativamente igual embora os três maiores emissores de gases com efeito de estufa, o aço de alta liga, o cimento e o betão, representem cerca de 60% do total das emissões. O valor percentual associado a este último é o mais elevado pois o estudo utilizado é referente a centrais com turbinas de betão. No caso de ser utilizada a parte do mesmo estudo, referente a centrais com turbinas de aço, existiria uma diminuição da percentagem do valor de emissão do betão e dos seus constituintes bem como do aço de alta liga, pois é necessária uma maior quantidade destes materiais para a construção de turbinas a betão. Por sua vez as percentagens associadas à tinta e o aço com carbono aumentariam embora os seus valores não alterassem de grande forma o perfil de emissões da fase de construção.

## 8.2 Emissões na fase de construção

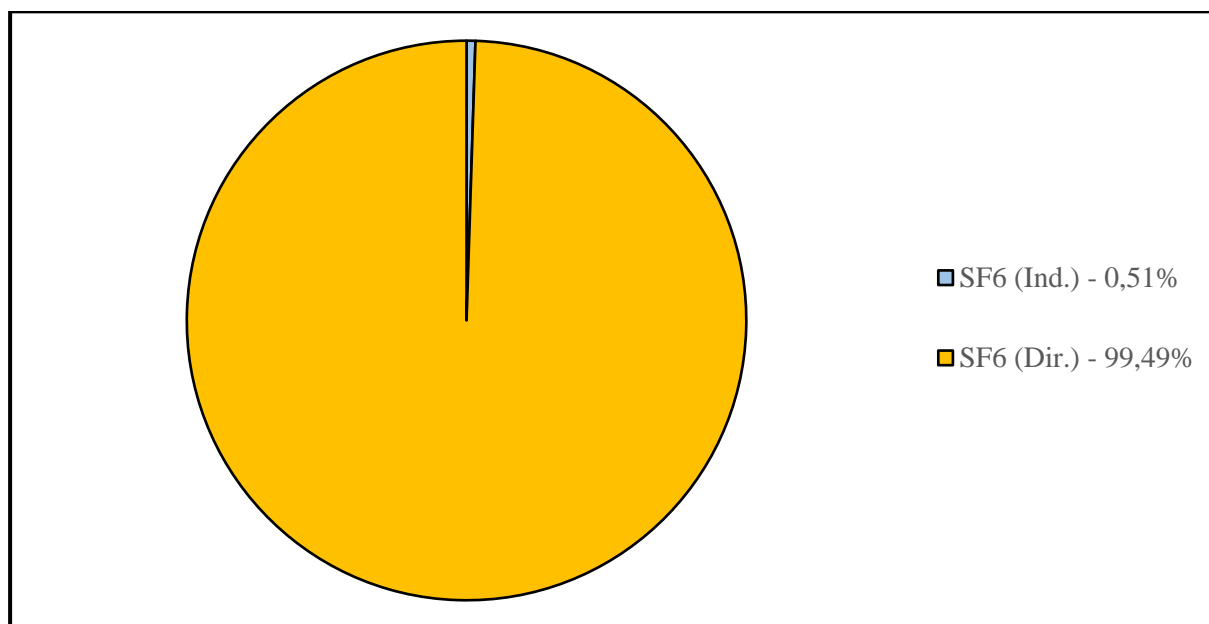
Para as emissões na fase de operação foi novamente utilizado o estudo da empresa Vestas <sup>[R.35]</sup> devido ao facto de não existirem valores de consumo e de emissões no domínio público. Os valores de consumo por eletricidade produzida do estudo utilizado foram considerados constantes ao longo do período em estudo. A lista completa de consumos está apresentada na Tabela 8.6.

*Tabela 8.6: Listagem dos consumos contabilizados nesta dissertação, presentes na fase de operação de uma central eólica com potência nominal de 50 MW e tempo de vida de 20 anos, tal como descrito no estudo de análise do ciclo de vida da produção de eletricidade por uma central eólica onshore, conduzido pela Vestas [R.35].*

| Material        | Quantidade<br>(kg/MWh <sub>prod.</sub> ) |
|-----------------|--|
| SF <sub>6</sub> | 6,40E-05                                 |

Na fase de operação das centrais eólicas apenas foi considerada uma única fonte de emissões de gases com efeito de estufa, o SF<sub>6</sub>. Este composto químico não só possui emissões indiretas, mas também emissões diretas quando existe uma fuga deste para a atmosfera, sendo o seu potencial de aquecimento global tabelado como equivalente a 23000 vezes a emissão da mesma massa de CO<sub>2</sub>, tal como referido no quinto relatório do IPCC para uma escala de 100 anos [R.26].

Para uma análise percentual de cada uma das emissões associadas ao consumo de SF<sub>6</sub> na fase de operação foram utilizados os valores médios obtido para cada emissão para o período de 2015 a 2018, inclusive. As percentagens referentes a estes impactos estão representadas na Figura 8.3 e servem para dividir o valor total de emissão de gases com efeito de estufa que ocorrem na fase de operação, sendo este valor equivalente a  $2 \times 10^4 \text{ t CO}_{2eq}/\text{ano}$ .



*Figura 8.3: Divisão das diversas fontes de emissão na fase de operação de uma central eólica.*

Analisando a Figura 8.3 é possível observar que as emissões diretas causadas pela fuga de SF<sub>6</sub> para a atmosfera correspondem praticamente à totalidade das emissões na fase de operação sendo que a produção deste composto químico tem um impacto praticamente insignificante no valor total final.

### 8.3 Análise do perfil de emissões anuais

Com base no valor total médio das emissões anuais na fase de construção obtido anteriormente e com o valor total anual de emissões na fase de operação para cada ano estudado é possível construir a Figura 8.4. Nesta figura é possível comparar não só a diferença de impacto entre as emissões em fase de construção e operação, mas também a variação do total de ambas ao longo do período em estudo. É, também, apresentada uma barra de erro que demonstra a variabilidade do valor das emissões totais na fase de construção entre o valor mínimo e máximo obtido a partir dos 4 estudos utilizados.

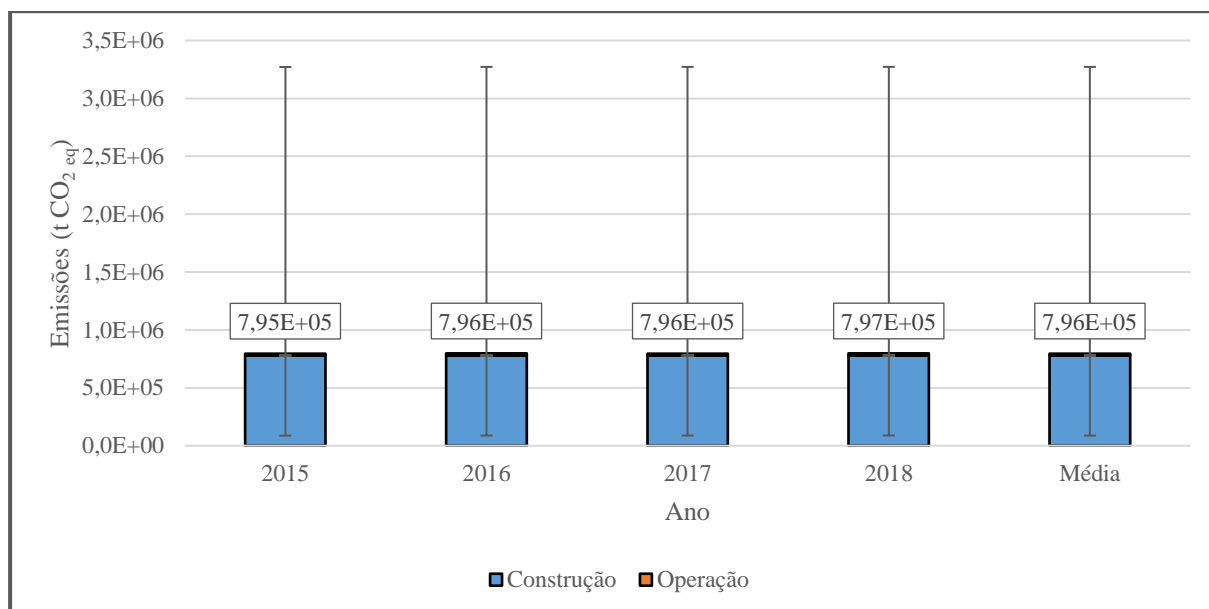


Figura 8.4: Gráfico da variação anual das emissões de gases com efeito de estufa nas fases de construção e operação, e, por sua vez, das emissões totais, referentes às centrais eólicas em funcionamento em Portugal continental entre 2015 e 2018, inclusive, e a média destes valores. No gráfico também encontra-se representado o erro presente nos cálculos referentes a estas centrais, efetuados nesta dissertação.

Na Figura 8.4 observa-se uma grande diferença entre os valores de emissões na fase de construção e de operação em todos os anos estudados. Ao contrário de ambos os tipos de centrais termoelétricas, o valor das primeiras tem uma ordem de grandeza muito superior ao valor das segundas e, assim, é possível concluir que a influência das emissões na fase de operação nas emissões totais anuais nas centrais eólicas é muito baixa. Em termo de valores médios, a fase de operação ocupa apenas 2% das emissões totais. A barra de erro existente na mesma figura demonstra, no caso destas centrais, o papel importante das emissões na fase de construção nas emissões totais em estudo nesta dissertação pois a sua variação influencia de maneira significativa a quantidade total de gases com efeito de estufa que são emitidos anualmente.

### 8.4 Fator de emissão

Com o conhecimento das emissões totais reais, obtidas pela junção das emissões totais da fase de construção e operação, foi obtido o fator de emissão de gases com efeito de estufa em função da energia elétrica produzida pelas centrais eólicas em Portugal continental não só para cada ano em estudo, mas também uma média destes valores, estando estes apresentados na Tabela 8.7.



Tabela 8.7: Fator de emissão total médio calculado anualmente para centrais eólicas e a sua média de valores.

| Fator de emissão médio<br>( $g\ CO_{2eq}/kWh$ ) | Ano   |       |       |       |       |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
|   | 2015  | 2016  | 2017  | 2018  | Média |
| Total   | 67,21 | 64,74 | 65,88 | 64,49 | 66,54 |

Com a Tabela 8.7 foi, posteriormente, possível calcular o fator de emissão real do *mix* de geração de energia elétrica de Portugal continental. O cálculo deste fator e a comparação dos fatores de emissão dos vários tipos de central serão apresentados posteriormente no capítulo referente aos resultados totais.

### 8.5 Área ocupada

Com base na listagem de centrais devidamente georreferenciadas e com o auxílio de SIG, foram vetorizados polígonos representativos da área geográfica de cada central, sendo importante referir que no caso das centrais eólicas foram tidas em conta as estradas de acesso às turbinas e as turbinas em si. A Figura 8.5 representa um exemplo dos polígonos obtidos.

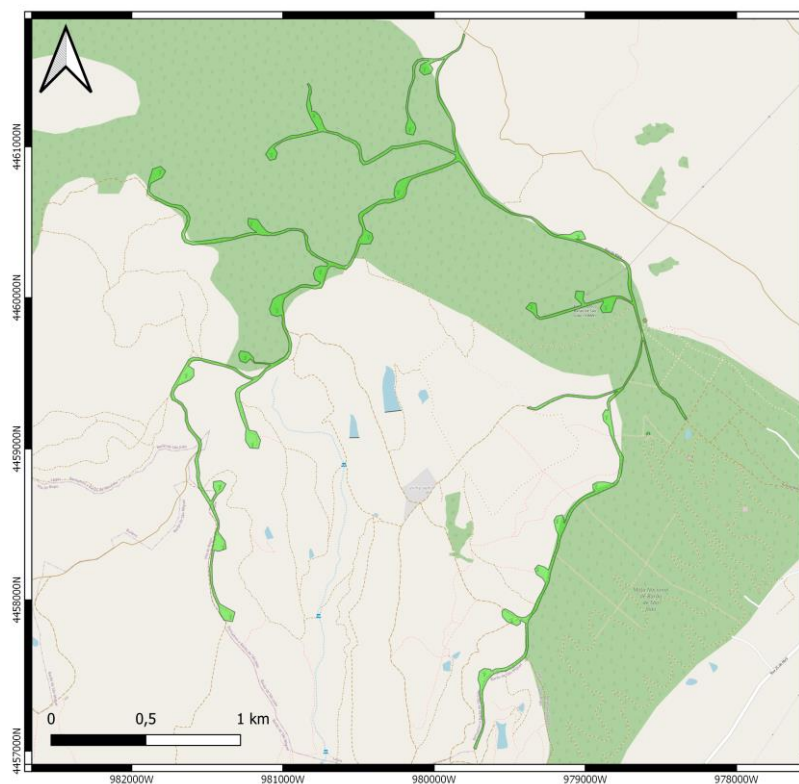


Figura 8.5: Exemplo de área de uma central eólica mapeada. Neste exemplo é observável a área correspondente às turbinas eólicas da central de Barão de São João e as estradas de acesso a essas turbinas.

A partir dos polígonos vetorizados foi determinado o valor total de área ocupada por cada central. A Tabela 8.8 demonstra a variação da área ocupada por centrais eólicas ao longo do período de tempo estudado e a correspondente percentagem da área de Portugal continental associada ao mesmo tipo de centrais.



Tabela 8.8: Evolução da área ocupada para produção de energia elétrica através de centrais eólicas durante o período de estudo, 2015 a 2018, inclusive, e a sua ocupação percentual da área de Portugal continental <sup>[R.27]</sup>.

|                                     | Ano   |       |       |       |       |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                     | 2015  | 2016  | 2017  | 2018  | Média |
| Área total (km <sup>2</sup> )       | 51,08 | 51,77 | 51,77 | 51,96 | 51,65 |
| Percentagem de ocupação do país (%) | 0,06  | 0,06  | 0,06  | 0,06  | 0,06  |

Tal como observado na Tabela 8.8, existiu um ligeiro aumento na área ocupada pelas centrais eólicas ao longo do período de tempo em estudo. Apesar disso, a percentagem de ocupação do país por este tipo de centrais é bastante baixa, 0,06% da área de Portugal continental, sendo que esta, no fim do período estudado, é equivalente a 7277 campos de futebol com dimensões de 105 × 68 m.

### 8.6 Erro associado à área ocupada

Devido a não existirem valores referentes à área ocupada por centrais eólicas em Portugal continental, de modo a calcular o erro associado aos valores de área calculados para estas, foram utilizados valores teóricos baseados na produção de energia esperada por centrais deste tipo. O estudo utilizado refere um intervalo de valores, associados a centrais eólicas no Reino Unido, entre 1,15 km<sup>2</sup>/TWh, para centrais eólicas onshore com as condições mais favoráveis para o aproveitamento desta fonte de energia, e 44,17 km<sup>2</sup>/TWh, para centrais offshore. A comparação entre este intervalo de valores e os valores obtidos para a área ocupada por este tipo de centrais em Portugal continental está descrito na Tabela 8.9.

Tabela 8.9: Comparação entre os valores de área geográfica ocupada obtidos nesta dissertação e o intervalo de valores obtido para centrais eólicas onshore e offshore no Reino Unido.

|  | Ano    |        |        |        |        |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|
|  | 2015   | 2016   | 2017   | 2018   | Média  |
| Área total (km <sup>2</sup> )                            | 51,08  | 51,77  | 51,77  | 51,96  | 51,65  |
| Área teórica mínima <sup>[R.59]</sup> (km <sup>2</sup> ) | 12,99  | 13,97  | 13,72  | 14,16  | 13,71  |
| Área teórica máxima <sup>[R.59]</sup> (km <sup>2</sup> ) | 500,62 | 538,34 | 528,84 | 545,54 | 528,33 |

Antes de analisar os resultados obtidos, é necessário notar que os valores utilizados para calcular a área geográfica teoricamente necessário são referentes ao Reino Unido que possui um potencial eólico muito superior ao de Portugal continental, assim é esperado que o valor seja superior ao valor mínimo teórico. Apesar disso, a área necessária para centrais eólicas offshore é muito superior à área necessária para centrais onshore, logo o valor para Portugal continental deverá ser muito inferior à área teoricamente necessária para centrais offshore. Tal como é observado na tabela anterior, apesar do valor médio da área obtida ser equivalente a 4 vezes o valor teórico mínimo, este é cerca de 10 vezes inferior ao valor máximo.

### 8.7 Análise à área ocupada

O valor total da área ocupada por este tipo de centrais foi cruzado com os valores de potência instalada e de eletricidade produzida em cada ano, obtendo valores referentes à utilização da área para cada ano, sendo estes as razões área ocupada/potência instalada, e área ocupada/eletricidade produzida. As Figura 8.6 e Figura 8.7 são referentes às variações anuais destas duas razões ao longo do período em estudo. Em termos de valores médios, para a razão área ocupada/potência instalada, e área ocupada/eletricidade produzida, foi obtido o valor 10 m<sup>2</sup>/kW e 4 × 10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/kWh, respetivamente.

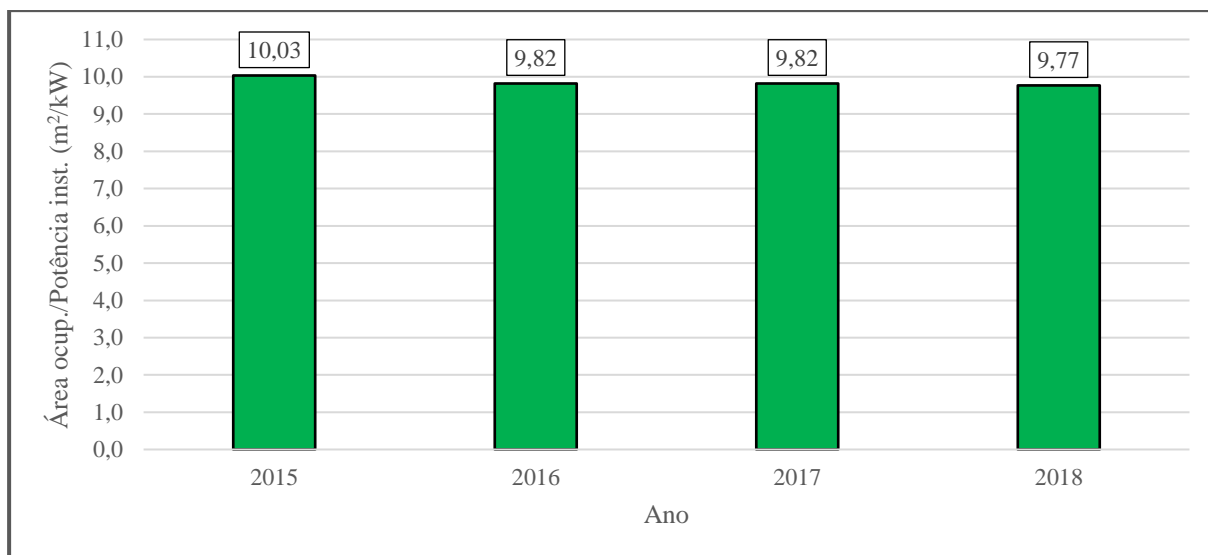


Figura 8.6: Gráfico da evolução anual da razão de área ocupada por potência instalada para centrais eólicas estudadas entre 2015 e 2018, inclusive.

Como é possível observar na Figura 8.6, existiu apenas uma ligeira diminuição do valor da razão ao longo do período em estudo equivalente a  $0,3 m^2/kW$  entre 2015 e 2018 apesar da instalação de novas centrais eólicas. No capítulo dos resultados totais será comparada esta razão entre os diversos tipos de centrais, sendo utilizado o valor médio do período em estudo, permitindo assim uma análise holística de cada uma das tecnologias nos anos estudados.

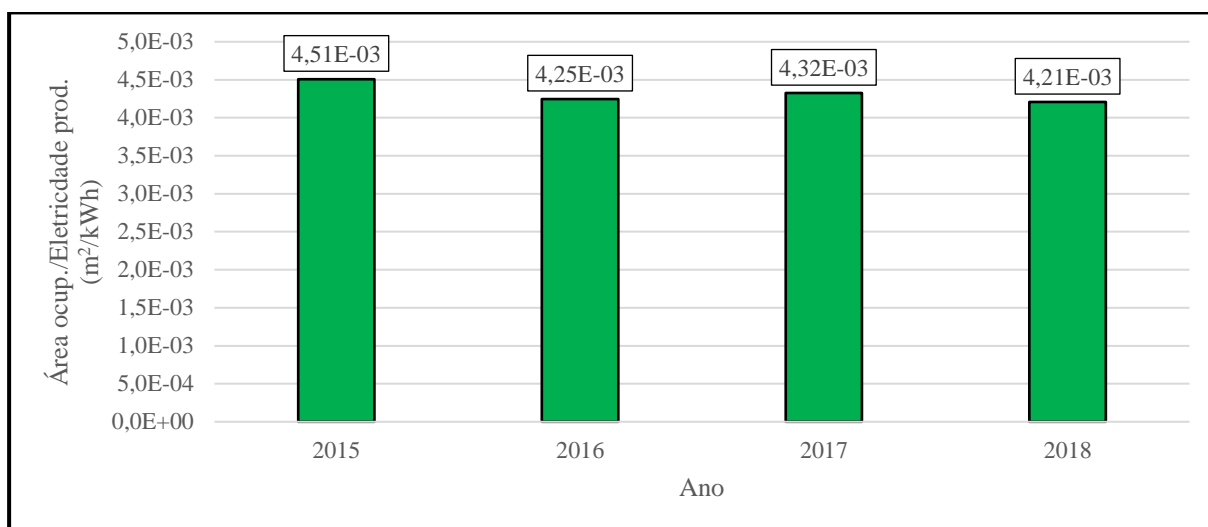


Figura 8.7: Gráfico da evolução anual da razão de área ocupada por eletricidade produzida para centrais eólicas estudadas entre 2015 e 2018, inclusive.

Na Figura 8.7 é demonstrado que não existe grande variação nos valores da razão área ocupada/eletricidade produzida ao longo do período de tempo estudado. Apesar da irregularidade diária que é por vezes apresentada por este tipo de centrais, ao analisar novamente a Tabela 3.4, é observado que, anualmente, a energia elétrica produzida por estas tem-se mantido constante. Por outro lado, o crescimento da área ocupada por centrais eólicas de 2015 para 2018 é correspondente a apenas 2% da área já ocupada em 2015. Assim, é natural observar a estabilidade desta razão ao longo do período estudado. Ao utilizar a média dos valores anuais será possível comparar os valores obtidos para esta razão nos diversos tipos de centrais, sendo essa comparação apresentada no capítulo referente aos resultados totais.

## 9. Centrais solar fotovoltaicas

As centrais solar fotovoltaicas correspondem a 101 das 528 centrais estudadas nesta dissertação sendo que, em média, estas produzem anualmente 0,81 TWh de eletricidade, o que corresponde a 1,51% da energia elétrica média produzida num ano em Portugal continental no período de 2015 e 2018. Devido à inexistência de valores referente a qualquer uma das centrais solar fotovoltaicas em estudo nas declarações ambientais da EDP, 100% da energia produzida tem origem desconhecida que foi então assumida neste estudo. Ao longo do intervalo de 2015 a 2018 houve alteração do valor de potência instalada em Portugal continental já que parte das centrais em estudo foi construídas depois de 2015. Das centrais em estudo, 4, 7 e 10 destas foram construídas em 2016, 2017 e 2018, respetivamente.

Na Figura 9.1 estão representadas todas as centrais solar fotovoltaicas estudadas, em funcionamento entre 2015 e 2018, sobrepostas sobre o mapa de Portugal continental. Na Tabela 9.1 está representada a variação do número de centrais solar fotovoltaicas estudadas, a energia elétrica total produzida anualmente por todas as centrais deste tipo, o que representa o total de eletricidade produzida em Portugal continental, e as percentagens de energia com fonte conhecida e de fonte assumida, para cada um dos anos estudados.

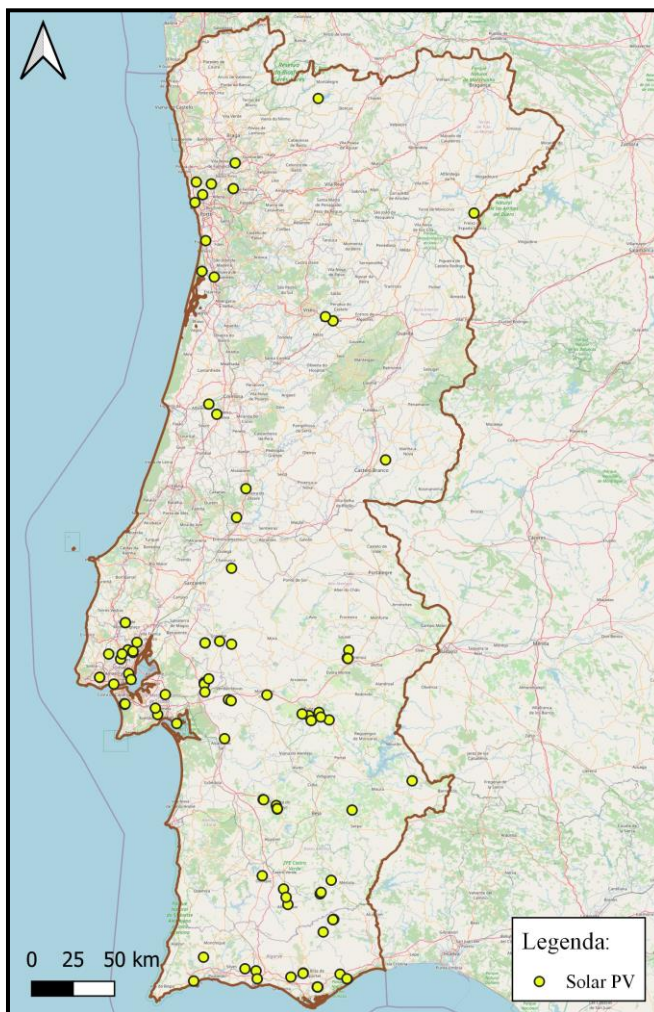


Figura 9.1: Mapa das centrais solar fotovoltaicas estudadas em Portugal continental entre os anos de 2015 e 2018, inclusive. (Dados provenientes do projeto e2p<sup>[R.5]</sup>).

Tabela 9.1: Evolução do número de centrais, potência instalada e energia elétrica produzida no conjunto de centrais solar fotovoltaicas estudadas em Portugal continental entre 2015 e 2018, inclusive, bem como as percentagens da energia elétrica total produzida com fonte conhecida e com fonte assumida.

|                                  | Ano    |        |        |        |
|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|
|                                  | 2015   | 2016   | 2017   | 2018   |
| Número de centrais estudadas     | 80     | 84     | 91     | 101    |
| Potência instalada (MW)          | 283,17 | 291,68 | 299,77 | 365,57 |
| Energia elétrica produzida (TWh) | 0,76   | 0,79   | 0,85   | 0,83   |
| Percentagem conhecida (%)        | 0      | 0      | 0      | 0      |
| Percentagem assumida (%)         | 100    | 100    | 100    | 100    |

## 9.1 Emissões na fase de construção

Para o cálculo das emissões na fase de construção para centrais solar fotovoltaicas foram utilizados 2 estudos diferentes, referentes a centrais localizadas na China e na Índia. As Tabela 9.2 e Tabela 9.3 contêm os valores utilizados na construção de cada uma das centrais referidas nos estudos. Devido à diferença nos valores de potência instaladas nas centrais dos estudos, os valores apresentados nas tabelas foram ajustados para valores de quantidade de massa de material ou energia necessária para um MW de potência instalada. No caso da célula de silício, foi considerado que o fator de emissão associado à produção da mesma é equivalente ao fator de emissão da produção de silício e é, também, importante referir que não foi possível obter valores de fator de emissão para a produção de parte dos materiais apresentados no estudo referente à central solar fotovoltaica instalada na China <sup>[R.36]</sup>. Assim, esses materiais não foram contabilizados nesta dissertação.

Tabela 9.2: Listagem de material utilizado na construção de uma central solar fotovoltaica com potência nominal de 0,001 MW e tempo de vida de 25 anos tal como descrito no estudo relativo à análise do ciclo de vida de sistemas solar fotovoltaicos na China [R.36].

| Material                        | Quantidade (kg/MW) | Quantidade (MWh/MW) |
|---------------------------------|--------------------|---------------------|
| Quartzo                         | 3,59E+04           | -                   |
| Carvão                          | 4,54E+04           | -                   |
| Óxido de cálcio                 | 6,52E+03           | -                   |
| Ácido clorídrico (20%)          | 2,93E+03           | -                   |
| Ácido clorídrico (30%)          | 2,63E+03           | -                   |
| Hidrogénio                      | 5,00E+02           | -                   |
| Ácido nítrico                   | 1,65E+03           | -                   |
| Azoto                           | 7,88E+04           | -                   |
| Hidróxido de sódio (20%)        | 4,86E+03           | -                   |
| Água                            | 1,24E+07           | -                   |
| Elettricidade                   | -                  | 8,97E+02            |
| Vapor de água                   | 4,35E+05           | -                   |
| Ácido fluorídrico               | 1,03E+03           | -                   |
| Vidro                           | 6,57E+04           | -                   |
| Detergente                      | 2,23E+03           | -                   |
| Amoníaco                        | 8,81E+01           | -                   |
| Etanol                          | 5,72E+04           | -                   |
| Ácido fosfórico                 | 9,31E+00           | -                   |
| Hidróxido de potássio           | 2,76E+03           | -                   |
| Prata                           | 6,79E+01           | -                   |
| Alumínio                        | 1,22E+04           | -                   |
| Gás natural                     | 5,90E+02           | -                   |
| Polietileno tereftalato (PET)   | 3,27E+03           | -                   |
| Fluoreto de polivinil (PVF)     | 3,27E+03           | -                   |
| Espuma vinílica acetinada (EVA) | 7,52E+03           | -                   |
| Isopropanol                     | 1,77E+01           | -                   |

Tabela 9.3: Listagem de material utilizado na construção de uma central solar fotovoltaica com potência nominal de 0,025 MW e tempo de vida de 25 anos tal como descrito no estudo relativo à análise do ciclo de vida de sistemas solar fotovoltaicos na Índia [R.37].

| Material                        | Quantidade (kg/MW) | Quantidade (MWh/MW) |
|---------------------------------|--------------------|---------------------|
| Célula de silício               | 9,42E+03           | -                   |
| Vidro                           | 5,10E+04           | -                   |
| Espuma vinílica acetinada (EVA) | 1,56E+03           | -                   |
| Alumínio                        | 3,92E+04           | -                   |
| Cobre                           | 7,80E+02           | -                   |
| Elettricidade                   | -                  | 1,18E+03            |

Devido à variação dos materiais considerados nos 2 estudos e das quantidades utilizadas do mesmo material em estudos diferentes, foi necessário construir 2 novos estudos para as emissões na fase de construção das centrais solar fotovoltaicas em Portugal continental, posteriormente, cruzando-os de modo a obter um valor mais próximo da realidade. Para que nestes estudos fossem calculadas as emissões reais foi tido em conta as emissões indiretas e diretas de cada material em estudo e, para isso,

foi necessário analisar o propósito da utilização de cada material. No caso destes 2 estudos, apenas o carvão e o gás natural emitem gases com efeito de estufa quando são utilizados. O valor total médio das emissões de gases com efeito de estufa libertados na fase de construção foi agrupado, posteriormente, com o valor das emissões na fase de operação para cada ano do período de tempo em estudo de modo a analisar o verdadeiro impacto ambiental que este tipo de central tem anualmente.

Para uma análise percentual do impacto de cada material na fase de construção deste tipo de central foi utilizado o valor médio dos totais obtidos para esta fase, e o estudo com maior número de materiais utilizados, referido na Tabela 9.2. As percentagens do impacto de cada material no valor total do estudo com o maior número de materiais utilizados foi utilizadas para subdividir as emissões totais pelos diversos materiais utilizados. A Figura 9.2 representa esta divisão, sendo o valor total médio obtido a partir dos 2 estudos analisados, considerado o mais realista, equivalente a  $2,40 \times 10^4 \text{ t CO}_{2eq}/\text{ano}$ .

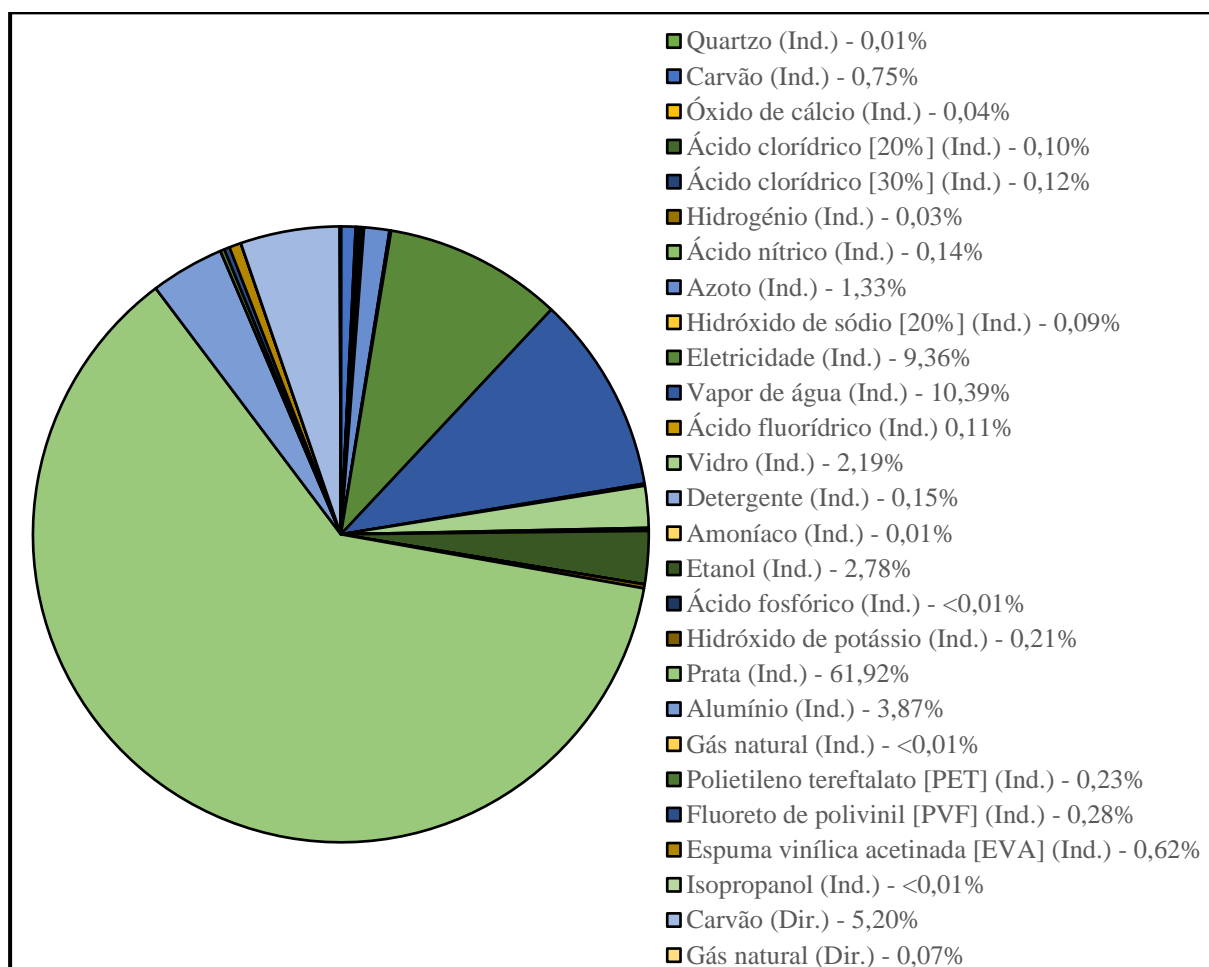


Figura 9.2: Divisão das diversas fontes de emissão na fase de construção de uma central solar fotovoltaica.

A partir da Figura 9.2, observou-se que as emissões referentes à fase de construção são repartidas por um grande número de materiais, mas a prata apresenta uma dominância nestas emissões, representado 62% do total de gases com efeito de estufa emitidos. Este facto é devido ao alto fator de emissão associado a este metal, muito utilizado na construção de painéis solar fotovoltaicos. Em junção à prata, o vapor de água, eletricidade consumida, etanol, vidro, e o alumínio representam as partes secundárias mais importantes da construção deste tipo de centrais, constituindo 91% das emissões totais desta fase e permitindo já uma boa aproximação ao valor real, mesmo quando excluída a utilização direta de combustíveis fósseis.

## 9.2 Emissões na fase de operação

Para as emissões na fase de operação foi utilizado um estudo referente a vários sistemas solar fotovoltaicos [R.38] devido ao facto de não existirem valores de consumo e de emissões no domínio público. Deste estudo foi escolhida a análise à fase de operação de sistemas solar fotovoltaicos de alta concentração e os valores de consumo por potência instalada do estudo utilizado foram considerados constantes ao longo do período em estudo. A lista completa de consumos está apresentada na Tabela 9.4.

*Tabela 9.4: Listagem dos consumos contabilizados nesta dissertação, presentes na fase de operação de uma central solar fotovoltaica de alta concentração com potência nominal de 0,053 MW e tempo de vida de 30 anos, tal como descrito no estudo de análise do ciclo de vida de vários sistemas solar fotovoltaicos [R.38].*

| Material                               | Quantidade<br>(kg/MW <sub>inst.</sub> ) |
|--|---|
| Óleo lubrificante                      | 4,72E+02                                |
| Polycarbonato                          | 5,66E+01                                |
| Poliuretano                            | 1,70E+02                                |
| Acrilonitrila butadieno estireno (ABS) | 7,55E+02                                |
| Poliamida                              | 1,89E+01                                |
| Aço inoxidável                         | 1,32E+02                                |
| Fibra de vidro                         | 1,32E+02                                |

Ao analisar a Tabela 9.4 é possível observar que existem diversas fontes de emissões de gases com efeito de estufa na fase de operação das centrais solar fotovoltaicas. Tal como na fase de construção, estes consumos foram analisados em termos de emissões indiretas e diretas, sendo assim possível obter valores totais de emissão de gases com efeito de estufa na fase de operação. No caso dos materiais utilizados pelas centrais solar fotovoltaicas, nenhum apresenta um uso que gere emissões diretas.

Para uma análise percentual do impacto das emissões da fase de operação foi utilizado o estudo anteriormente referido, os valores médios anuais das emissões indiretas dos consumos analisados, e, também, a média dos totais das emissões provenientes da fase de operação no período entre 2015 e 2018. As percentagens obtidas relativas ao impacto de cada consumo nas emissões totais desta fase do ciclo de vida das centrais está representado na Figura 9.3, sendo o valor total médio de emissões de gases com efeito de estufa equivalente a  $2 \times 10^3 \text{ t CO}_{2eq}/ano$ .



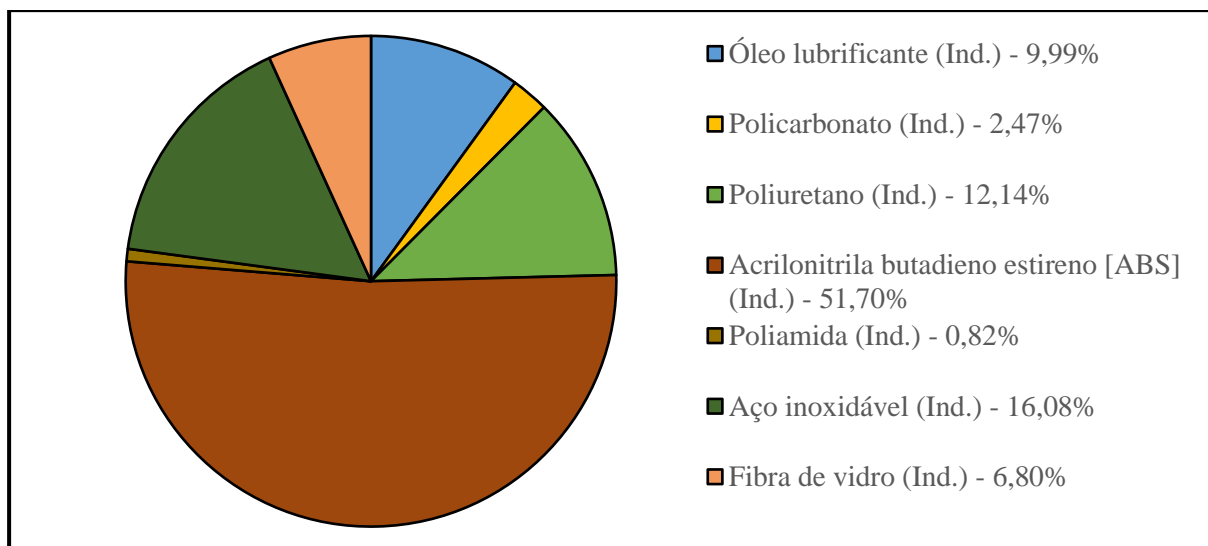


Figura 9.3: Divisão das diversas fontes de emissão na fase de operação de uma central solar fotovoltaica.

Analisando a Figura 9.3 é possível observar que as emissões associadas ao copolímero acrilonitrila butadieno estireno correspondem a cerca de 52% da totalidade das emissões na fase de operação sendo que os outros materiais também possuem impactos significantes no valor total final. Todos os materiais aparentam ser utilizados para reparação ou restituição de painéis danificados podendo, assim, variar o valor real associado a uma central específica. Apesar disso, em termos médios, todos estes materiais são utilizados ao longo do tempo de vida das centrais solar fotovoltaicas.

### 9.3 Análise do perfil de emissões anuais

Com base no valor total médio das emissões anuais na fase de construção obtido anteriormente e com o valor total anual de emissões na fase de operação para cada ano estudado é possível construir a Figura 9.4. Esta figura compara não só as emissões em fase de construção e operação, mas também a variação do total de ambas ao longo do período em estudo, sendo que é, também, apresentada uma barra de erro que demonstram a variabilidade do valor das emissões totais da fase de construção entre o valor mínimo e máximo obtido a partir dos 2 estudos utilizados.



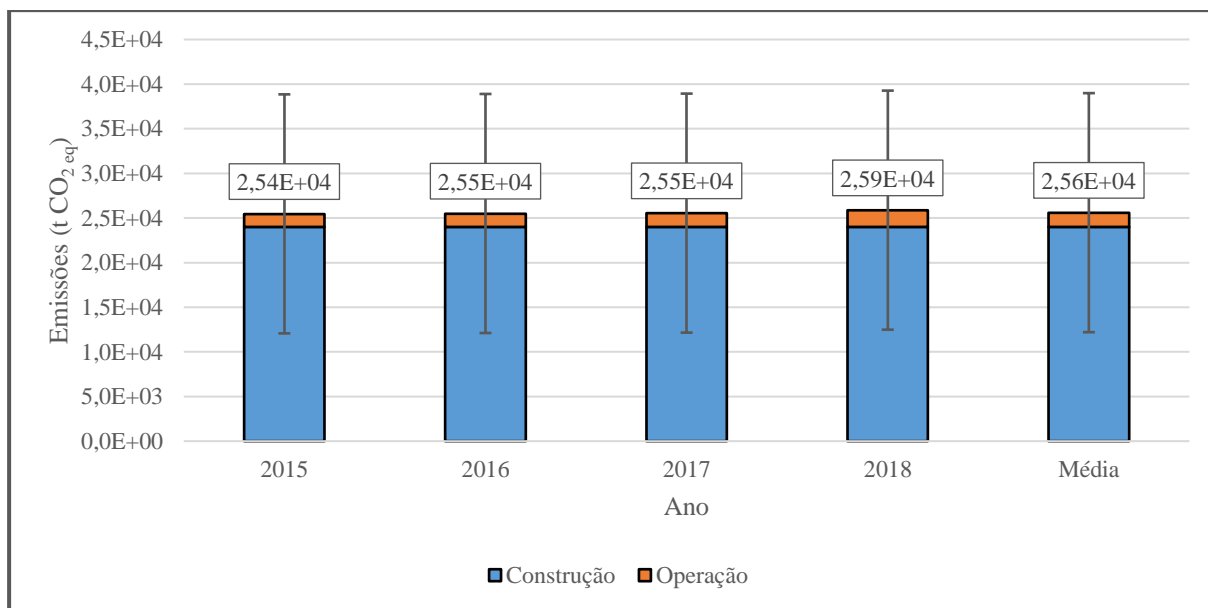


Figura 9.4: Gráfico da variação anual das emissões de gases com efeito de estufa nas fases de construção e operação, e, por sua vez, das emissões totais, referentes às centrais solar fotovoltaicas em funcionamento em Portugal continental entre 2015 e 2018, inclusive, e a média.

Na Figura 9.4 observa-se uma grande diferença entre os valores de emissões na fase de construção e de operação em todos os anos estudados. Semelhantemente às centrais eólicas, o valor associado à fase de construção tem uma ordem de grandeza superior ao valor associado à fase de operação e, assim, é possível concluir que a influência das emissões da segunda fase nas emissões totais anuais nas centrais solar fotovoltaicas é muito baixa. A barra de erro existente na mesma figura demonstra o papel importante das emissões na fase de construção nas emissões totais em estudo nesta dissertação pois a sua variação influencia de maneira significativa a quantidade total de gases com efeito de estufa que são emitidos anualmente.

#### 9.4 Fator de emissão

Com o conhecimento das emissões totais reais, obtidas pela junção das emissões totais da fase de construção e operação, foi obtido o fator de emissão de gases com efeito de estufa em função da eletricidade produzida pelas centrais solar fotovoltaicas em Portugal continental não só para cada ano em estudo, mas também uma média destes valores, estando estes apresentados na Tabela 9.5.

Tabela 9.5: Fator de emissão total médio calculado anualmente para centrais solar fotovoltaicas e a sua média de valores.

| Fator de emissão médio<br>( $g\ CO_{2eq}/kWh$ ) | Ano   |       |       |       |       |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
|   | 2015  | 2016  | 2017  | 2018  | Média |
| Total   | 29,50 | 29,27 | 27,64 | 31,19 | 31,70 |

Com a Tabela 9.5 foi, posteriormente, possível calcular o fator de emissão real do *mix* de geração de energia elétrica de Portugal continental. O cálculo deste fator e a comparação dos fatores de emissão dos vários tipos de central serão apresentados posteriormente no capítulo referente aos resultados totais.

## 9.5 Área ocupada

A partir da listagem de centrais devidamente georreferenciadas e com o auxílio de mapas projetados, foram vetorizados, em ambiente SIG, polígonos representativos da área geográfica ocupada por cada central, sendo importante referir que no caso das centrais solar fotovoltaicas foram tidas em conta as estradas de acesso aos painéis solar fotovoltaicos e, estando estes, normalmente, dentro de um lugar fechado, foi considerada a área ocupada pelo espaço dentro da cerca como a área privada utilizada por estas centrais. A Figura 9.5 mostra um exemplo dos polígonos obtidos.

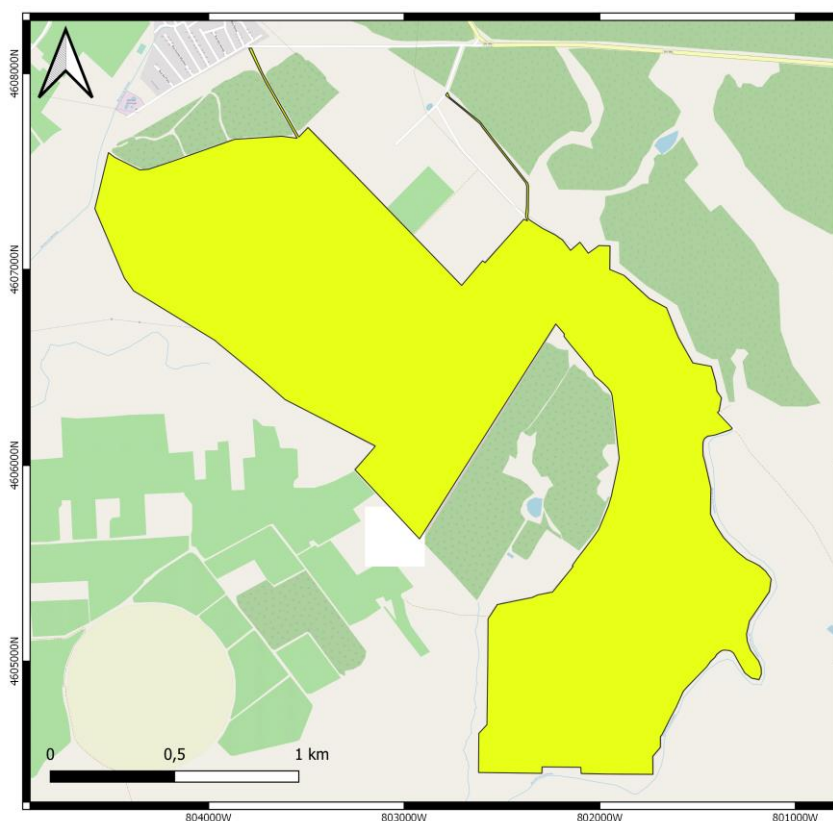


Figura 9.5: Exemplo de área de uma central solar fotovoltaica mapeada. Neste exemplo é observável a área correspondente à central de Amareleja e as estradas de acesso a esta.

A partir destes polígonos foi possível determinar o valor total de área ocupada por cada central. A Tabela 9.6 apresenta a variação da área ocupada por centrais solar fotovoltaicas ao longo do período de tempo estudado e a correspondente percentagem da área de Portugal continental associada ao mesmo tipo de centrais.

Tabela 9.6: Evolução da área ocupada para produção de energia elétrica através de centrais solar fotovoltaicas durante o período de estudo, 2015 a 2018, inclusive, e a sua ocupação percentual da área de Portugal continental <sup>[R.27]</sup>.

|                                     | Ano   |       |       |       |       |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                     | 2015  | 2016  | 2017  | 2018  | Média |
| Área total (km <sup>2</sup> )       | 10,80 | 11,04 | 11,22 | 12,56 | 11,41 |
| Percentagem de ocupação do país (%) | 0,01  | 0,01  | 0,01  | 0,01  | 0,01  |

Tal como observado na tabela anterior, existiu um grande aumento na área ocupada pelas centrais solar fotovoltaicas ao longo do período de tempo em estudo. Apesar disso, a percentagem de ocupação do país por este tipo de centrais continuou bastante baixa, correspondendo a 0,01% da área de Portugal

continental. No fim do período estudado, a área ocupada é equivalente a 1759 campos de futebol com dimensões de  $105 \times 68$  m.

## 9.6 Erro associado à área ocupada

Não existindo valores referentes à área ocupada por centrais solar fotovoltaicas em Portugal continental, o erro associado às áreas vetorizadas nesta dissertação foi calculado a partir de valores teóricos baseados na produção de energia esperada por centrais deste tipo. O valor utilizado é correspondente à área ocupada teoricamente esperada para centrais solar fotovoltaicas recentes, em termos relativos à data de publicação do estudo utilizado, e é equivalente a  $13,5 \text{ km}^2/\text{TWh}$ . A Tabela 9.7 apresenta os valores de área ocupada calculada nesta dissertação, a área teoricamente ocupada e o erro existente ao longo dos anos estudados.

*Tabela 9.7: Comparação entre a área total ocupada calculada para centrais solar fotovoltaicas e a área teoricamente necessária para produzir a mesma quantidade de energia, e o erro associado aos valores da área ocupada.*

|  | Ano   |       |       |       |       |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|
|  | 2015  | 2016  | 2017  | 2018  | Média |
| Área total ( $\text{km}^2$ )                     | 10,80 | 11,04 | 11,22 | 12,56 | 11,41 |
| Área teórica <sup>[R.60]</sup> ( $\text{km}^2$ ) | 10,26 | 10,61 | 11,52 | 11,19 | 10,89 |
| Erro associado às áreas obtidas (%)              | 5,23  | 4,05  | 2,54  | 12,25 | 4,69  |

Ao longo dos anos, o erro associado à área total ocupada foi diminuindo, com exceção do ano de 2018 onde apesar da área ocupada ter aumentado, a energia elétrica produzida diminuiu, logo o valor do erro associado aumentou consideravelmente.

## 9.7 Análise à área ocupada

O valor total da área ocupada por este tipo de centrais foi cruzado com os valores de potência instalada e de eletricidade produzida em cada ano de modo a obter informação sobre a utilização do espaço ocupado por estas centrais. Nesta dissertação foram estudadas duas razões relativas à utilização anual de área geográfica, as razões área ocupada/potência instalada, e área ocupada/eletricidade produzida. As Figura 9.6 e Figura 9.7 são referentes às variações anuais destas duas razões ao longo do período em estudo. Em termos de valores médios, para a razão área ocupada/potência instalada, e área ocupada/eletricidade produzida, foi obtido o valor  $37 \text{ m}^2/\text{kW}$  e  $1 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{kWh}$ , respetivamente.

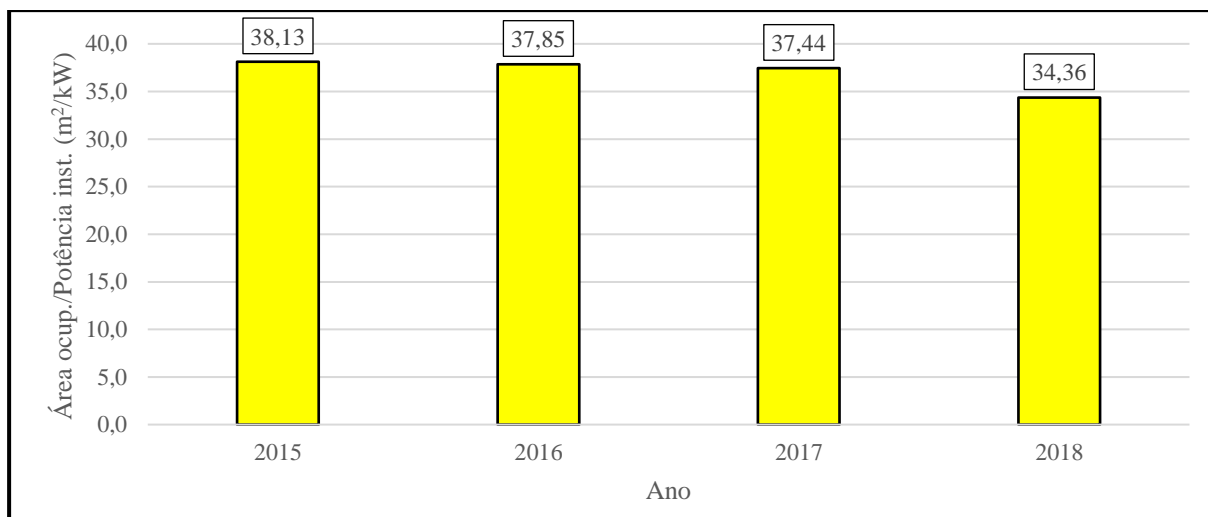


Figura 9.6: Gráfico da evolução anual da razão de área ocupada por potência instalada para centrais solar fotovoltaicas estudadas entre 2015 e 2018, inclusive.

Como é possível observar na Figura 9.6, existiu uma diminuição do valor da razão ao longo do período em estudo equivalente a 10% do valor de 2015 o que demonstra que existiu um ligeiro melhoramento na repartição do espaço total ocupado por este tipo de centrais para produção de energia elétrica devido à instalação de novas centrais, que permitiram, por sua vez, a instalação de uma maior potência por unidade de área. No capítulo dos resultados totais será comparada esta razão entre os diversos tipos de centrais. De modo a combater a variabilidade observada entre os anos estudados, o valor médio destes será utilizado.

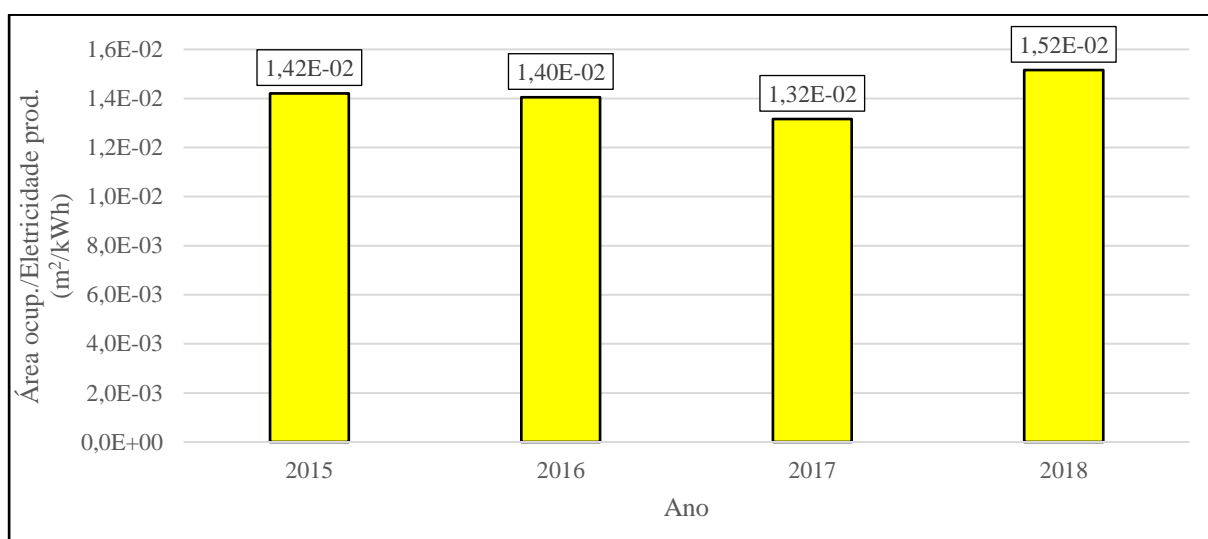


Figura 9.7: Gráfico da evolução anual da razão de área ocupada por eletricidade produzida para centrais solar fotovoltaicas estudadas entre 2015 e 2018, inclusive.

Na Figura 9.7 é demonstrado que existiu uma ligeira variação nos valores da razão área ocupada/eletricidade produzida ao longo do período de tempo estudado. Ao analisar novamente a Tabela 3.4, é observado que existiu um crescimento do valor de energia elétrica produzida por este tipo de centrais. Paralelamente, também existiu um crescimento da área ocupada por estas centrais, sendo que em 2018 a área total era equivalente a 116% da área inicial. Assim, é natural observar uma certa estabilidade nesta razão ao longo do período estudado. Ao utilizar a média dos valores anuais será possível comparar os valores obtidos nos diversos tipos de centrais. Essa comparação será apresentada no capítulo referente aos resultados totais.

## 10. Resultados totais

Após um estudo detalhado de cada um dos tipos de central de produção de energia elétrica apresentado anteriormente, foi importante cruzar essa informação de modo a ter um conhecimento mais profundo da situação existente durante o período compreendido entre 2015 e 2018 em termos de pegada carbónica e área ocupada para produção de eletricidade em Portugal continental.

### 10.1 Emissões de gases com efeito de estufa em Portugal continental

Antes de analisar as emissões calculadas nesta dissertação, é importante observar as emissões totais obtidas para cada ano em Portugal continental de modo a ter uma ideia da pegada carbónica total associada à produção de eletricidade. Este grupo de valores, bem como o seu valor médio, podem ser visualizados na Figura 10.1, apresentada a seguir.

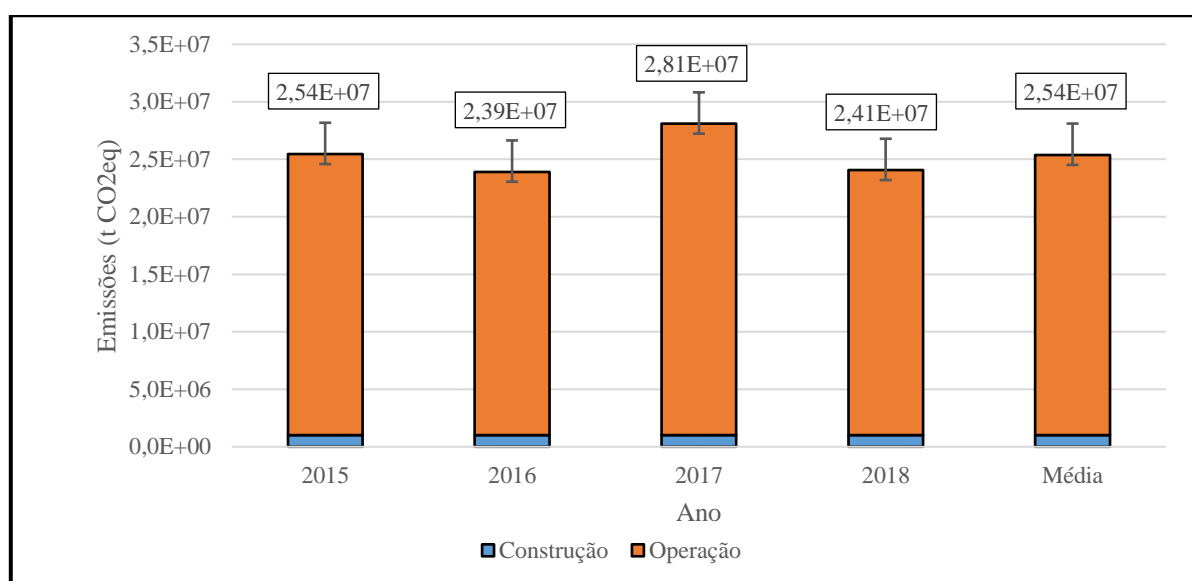


Figura 10.1: Gráfico da variação anual das emissões totais de gases com efeito de estufa associadas à produção de eletricidade a partir das centrais em funcionamento em Portugal continental entre 2015 e 2018, inclusive, e a sua média. No gráfico está, também, representada a subdivisão destas emissões pelas fases de construção e operação, e o erro presente nos valores obtidos para as emissões de gases com efeito de estufa na fase de construção.

Na Figura 10.1 é observado que as emissões na fase de operação correspondem à grande maioria das emissões totais associadas ao sistema de produção de eletricidade estudado nesta dissertação, sendo que estas correspondem, em média, a cerca de 96% dos valores totais. Para além disso, existe, também, uma ligeira variação nas emissões totais anuais para a produção de eletricidade em Portugal continental. Esta variação está altamente relacionada com o *mix* de geração de energia elétrica existente em cada um dos anos. Analisando novamente a Tabela 3.4, é possível verificar, como referido anteriormente, a alta variação nos valores percentuais de energia elétrica produzida pelas centrais hidroelétricas com albufeira de reserva. De modo a responder aos requerimentos de eletricidade consumida pelos utilizadores, essas variações têm de ser compensadas, substituindo a energia em falta nos vales deixados pelas centrais com essa tecnologia por energia produzida a partir de outros tipos de centrais. Devido ao facto da produção de eletricidade a partir de centrais eólicas ter uma natureza errática em termos diários, proveniente da grande variação existente na velocidade e direção do vento, e da dimensão de potência instalada por centrais solar fotovoltaicas, ambas estas tecnologias mantêm uma percentagem estável no *mix* de geração de energia elétrica. Assim, resta apenas a utilização das centrais termoelétricas a carvão e a gás natural para compensar a variação das centrais hidroelétricas, sendo assim possível verificar o aumento da percentagem destas no *mix* de geração de energia elétrica. Com este aumento, existiu também um

aumento das emissões totais anuais pois estas tecnologias são as que emitem uma maior quantidade de massa de gases com efeito de estufa para a atmosfera, especialmente na fase de operação. Este facto é observável quando as emissões totais médias anuais são subdivididas pelos diferentes tipos de centrais, tal como demonstrado na Figura 10.2.

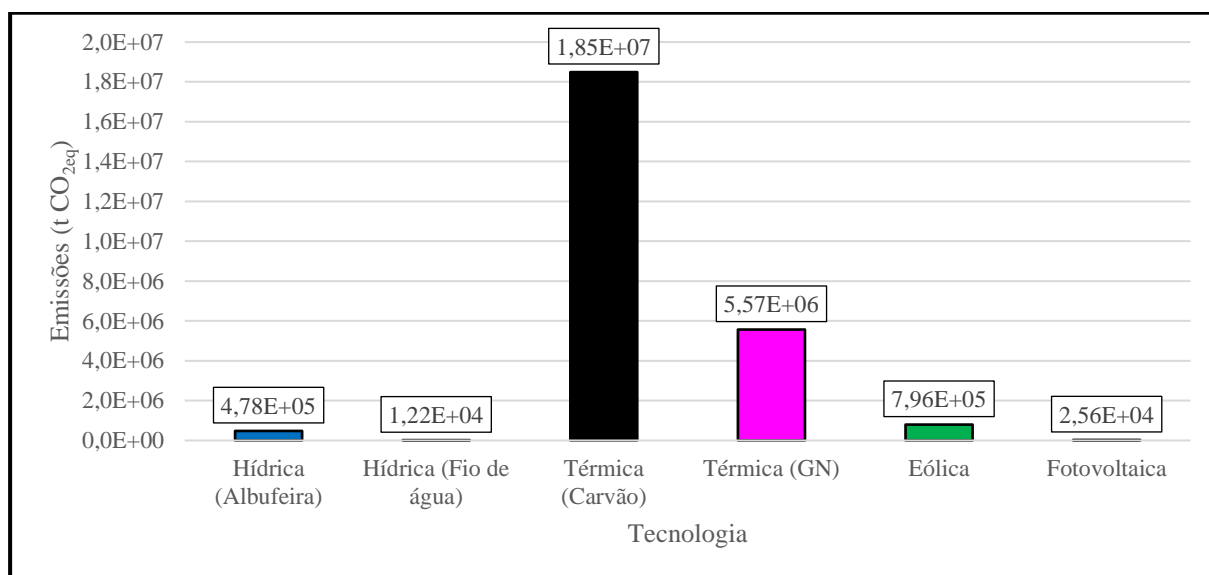


Figura 10.2: Gráfico de subdivisão das emissões totais médias de gases com efeito de estufa associadas à produção de eletricidade pelos diversos tipos de centrais em funcionamento em Portugal continental.

Com a subdivisão dos valores anuais médios apresentados na Figura 10.2, é possível observar que as centrais termoelétricas a carvão emitem um valor muito superior de gases com efeito de estufa quando comparados com todos os outros tipos de centrais, ou até mesmo com todas as outras centrais somadas, sendo que as centrais termoelétricas a carvão emitiram em média 73% da massa de gases com efeito de estufa, produzindo, em média, apenas 28% da energia elétrica total necessária. Para além disso, também é possível subdividir novamente estas emissões totais nas duas fases estudadas nesta dissertação de modo a compreender a influência de cada uma destas no valor total.

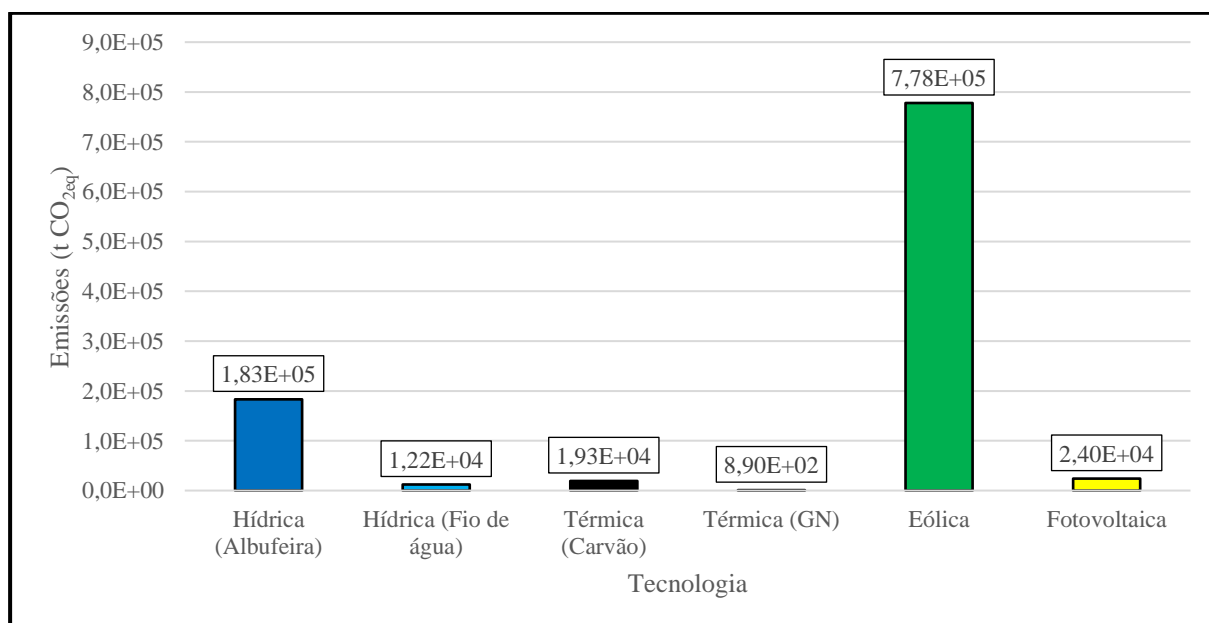


Figura 10.3: Gráfico de comparação das emissões totais médias de gases com efeito de estufa associadas à fase de construção dos diversos tipos de centrais em funcionamento em Portugal continental.

Na Figura 10.3 é aparente a dominância das centrais que utilizam energias renováveis nas emissões totais médias da fase de construção, sendo que estas correspondem a 98% das emissões de gases com efeito de estufa nesta fase. Tanto as centrais eólicas como as centrais hidroelétricas com albufeira correspondem à grande maioria das emissões libertadas nesta fase. Contrariamente, as restantes 4 tecnologias apresentam valores com uma ordem de grandeza inferior, não constituindo assim uma grande fatia das emissões totais.

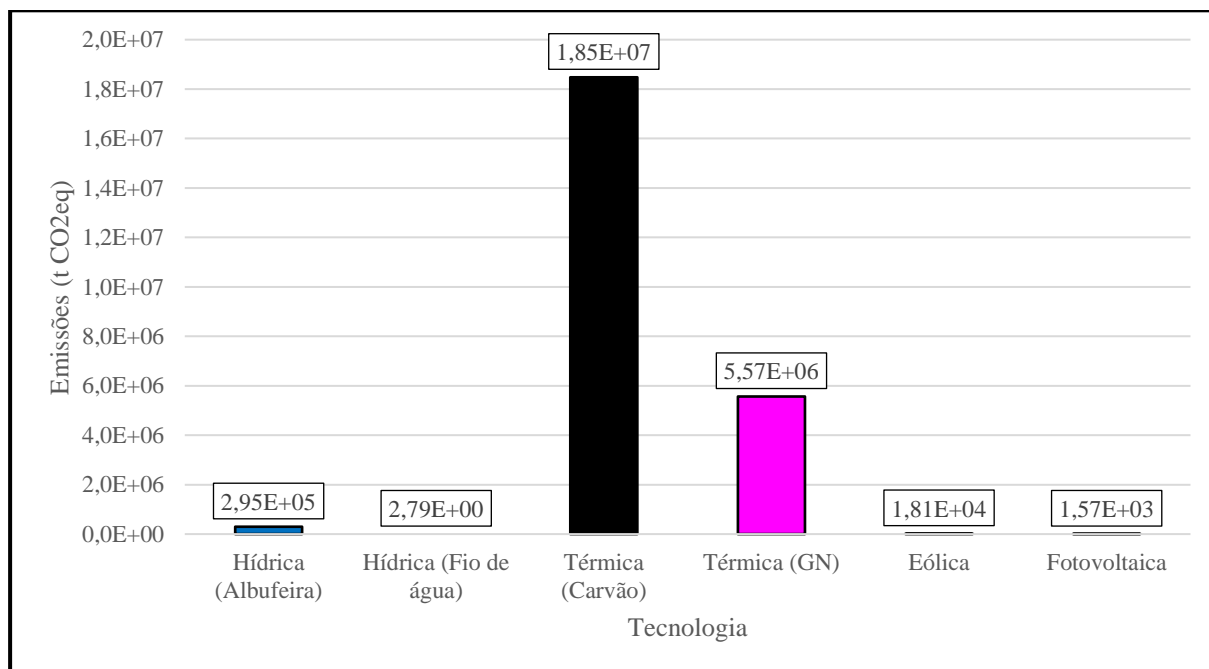


Figura 10.4: Gráfico de comparação das emissões totais médias de gases com efeito de estufa associadas à fase de operação dos diversos tipos de centrais em funcionamento em Portugal continental.

Em oposição à Figura 10.3, é observado que na Figura 10.4 as centrais termoelétricas constituem quase a totalidade das emissões na fase de operação, correspondendo a 99% das emissões totais nesta fase, e superam mesmo a totalidade das emissões na fase de construção por duas unidades de ordem de grandeza produzindo assim o domínio destas nas emissões totais médias já observado na Figura 10.2. Quanto às centrais que utilizam fontes de energia renovável, todas à exceção das centrais hidroelétricas com albufeira apresentam valores inferiores de emissão de gases com efeito de estufa na fase de operação, sendo que nas centrais hidroelétricas com albufeira o aumento do valor de emissões pode ser explicado pelo alto uso de eletricidade na fase de operação que, como foi explicado anteriormente, está relacionado com a capacidade de reversibilidade destas centrais.

## 10.2 Fator de emissão

Nesta dissertação foram tidos em conta dois tipos de fator de emissão, o direto e o total. O primeiro inclui unicamente as emissões associadas à queima do principal combustível fóssil utilizado para produção de eletricidade em centrais termoelétricas, sendo que nesta dissertação as únicas centrais deste tipo são as centrais termoelétricas a carvão e a gás natural, onde o carvão e o gás natural são, respetivamente, os combustíveis principais utilizados. Assim, apenas foi calculado este fator de emissão para estas. O segundo fator de emissão calculado contém não só as emissões referidas anteriormente mas também todas as restantes emissões calculadas nesta dissertação. Estes dois conjuntos distintos de fatores de emissão médios obtidos para cada uma das tecnologias estão apresentados abaixo nas Figura 10.5 e Figura 10.6, respetivamente.

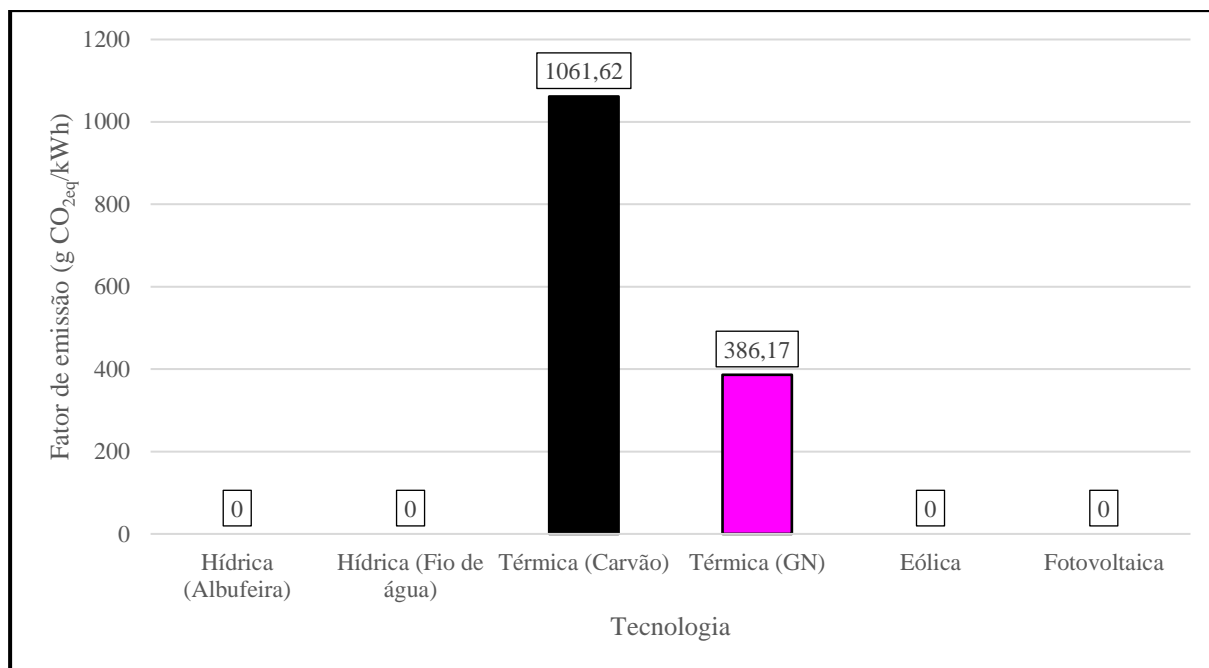


Figura 10.5: Gráfico de comparação entre o fator de emissão direta média associados a cada um dos tipos de centrais estudados nesta dissertação.

Tal como referido anteriormente, na Figura 10.5, os fatores de emissão direta para ambas as tecnologias hidroelétricas, solar fotovoltaica, e eólica foram fixados a  $0 \text{ g CO}_{2eq}/\text{kWh}$  pois estas não utilizam combustíveis fósseis como instrumento principal para produção de eletricidade. Das duas tecnologias com fator de emissão direta superior a 0, as centrais termoelétricas a carvão apresentam uma maior emissão de gases com efeito de estufa. Esta diferença nas emissões pode ser devida à diferença nas eficiências destas centrais. As centrais que utilizam gás natural possuem valores mais elevados de eficiência, o que leva à necessidade de utilizar uma quantidade inferior de combustível. A idade das centrais também pode ser um fator importante, sendo que, em média, as centrais a gás natural são mais recentes devido à tecnologia em si ser, também, mais recente, o que leva a que o decaimento das suas eficiências não seja ainda muito notável. Apesar destes dois casos influenciarem as emissões de cada tipo de central, o principal fator para esta diferença é o combustível utilizado já que o carvão possui uma maior quantidade de átomos de carbono na sua molécula para o mesmo número de átomos de hidrogénio quando comparado com o gás natural e ao proceder à queima destes combustíveis, estes originam uma maior quantidade de moléculas de dióxido de carbono. Assim, para a produção de 1 kWh, as centrais termoelétricas a carvão emitem cerca de 3 vezes mais que as centrais a gás natural.



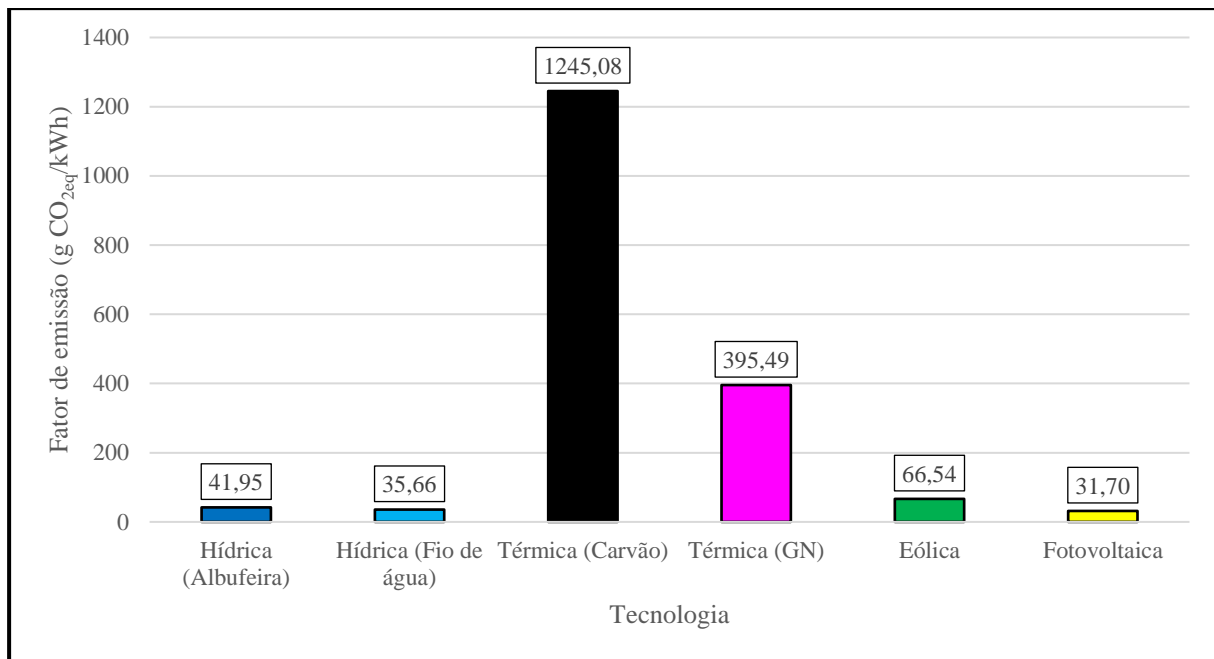


Figura 10.6: Gráfico de comparação entre o fator de emissão total médio associados a cada um dos tipos de centrais estudados nesta dissertação.

Na Figura 10.6 é possível observar a grande variação entre os fatores associados a cada tipo de central estudado. Ignorando outros fatores como área ocupada, valor de potência que é possível instalar, ou dispatchabilidade da tecnologia, as centrais solar fotovoltaicas, seguidas por perto pelas centrais hidroelétricas a fio de água, apresentam a melhor relação entre emissões de gases com efeito de estufa e eletricidade produzida, devendo, assim, ser priorizada a construção destas. Tendo em conta os outros fatores referidos anteriormente, exceto a área ocupada, que será analisada posteriormente, estes dois tipos de tecnologia apresentam limites e têm pouca influência no *mix* de geração de energia elétrica de Portugal continental existente no período de tempo estudado. As centrais hidroelétricas com albufeira de reserva e as centrais eólicas representam fatias maiores do *mix* de geração de energia elétrica tendo ainda a vantagem de terem um fator de emissão total na mesma ordem de grandeza das centrais solar fotovoltaicas, fazendo com que seja uma boa alternativa para a produção de eletricidade, quando não são tidos em conta outros fatores se não o fator de emissão. Por fim, as centrais termoelétricas a carvão continuam a ser as maiores emissoras de gases com efeito de estufa, seguidas das centrais termoelétricas a gás natural, sendo que grande parte, 85% e 99%, das emissões totais estão diretamente associadas às emissões diretas associadas à queima dos respetivos combustíveis fósseis principais, tornando-as nas piores escolhas para produção de eletricidade quando é tido em conta apenas o fator de emissão.

### 10.3 Comparação dos fatores de emissão total calculados com valores tabelados por tecnologia

De modo a perceber se os valores obtidos para os fatores de emissão totais são realistas, estes foram comparados a valores tabelado nos inventários da Ecoinvent e IPCC. Os valores existentes nesses inventários estão apresentados abaixo, na Figura 10.7, sendo que esta figura foi obtida a partir de um terceiro estudo [R.21].

| Electricity generation technology (EGT) | Emission factor [gCO <sub>2eq</sub> /kWh <sub>e</sub> ] |     | Name of EGT in Ecoinvent (for reproduction purposes)  | Emission factor [gCO <sub>2eq</sub> /kWh <sub>e</sub> ]<br>Ecoinvent (applied here) |
|---|---|-----|---|---|
|   | IPCC  | EEA |   |   |
| Biomass                                 | 740   | -   | Electricity, high voltage {SE}  heat and power co-generation, <b>wood chips</b> , 6667 kW, state-of-the-art 2014   Alloc Rec, U                       | 60 <sup>1</sup>   |
| Fossil brown coal/Lignite               | 820   | -   | Electricity, high voltage {DE}  electricity production, <b>lignite</b>   Alloc Rec, U   | 1240  |
| Fossil coal-derived gas                 | -   | -   | Electricity, high voltage {DE}  treatment of <b>coal gas</b> , in power plant   Alloc Rec, U  | 1667  |
| Fossil gas                              | 490   | -   | Electricity, high voltage {DK}  heat and power co-generation, <b>natural gas</b> , conventional power plant, 100MW electrical   Alloc Rec, U          | 529   |
| Fossil hard coal                        | 1001  | -   | Electricity, high voltage {DK}  heat and power co-generation, <b>hard coal</b>   Alloc Rec, U   | 1266  |
| Fossil oil                              | -   | -   | Electricity, high voltage {DK}  heat and power co-generation, <b>oil</b>   Alloc Rec, U   | 1000  |
| Fossil oil shale                        | -   | -   | No data in Ecoinvent (assumed value)  | 1000  |
| Fossil peat                             | -   | -   | Electricity, high voltage {FI}  electricity production, <b>peat</b>   Alloc Rec, U  | 1071  |
| Geothermal                              | 38  | -   | Electricity, high voltage {DE}  electricity production, <b>deep geothermal</b>   Alloc Rec, U   | 95  |
| Hydro pumped storage                    | 24  | -   | Electricity, high voltage {NO}  electricity production, <b>hydro, pumped storage</b>   Alloc Rec, U   | 62  |
| Hydro run-of-river and poundage         | 24  | -   | Electricity, high voltage {SE}  electricity production, <b>hydro, run-of-river</b>   Alloc Rec, U   | 5   |
| Hydro water reservoir                   | 24  | -   | Electricity, high voltage {NO}  electricity production, <b>hydro, reservoir</b> , alpine region   Alloc Rec, U  | 8   |
| Marine                                  | 24  | -   | No data in Ecoinvent (assumed value - as wind offshore)   | 18  |
| Nuclear                                 | 12  | -   | Electricity, high voltage {SE}  electricity production, <b>nuclear</b> , pressure water reactor   Alloc Rec, U  | 13  |
| Other                                   | -   | -   | No data in Ecoinvent (assumed value - avg. fossil fuels)  | 979   |
| Other RES                               | -   | -   | No data in Ecoinvent (assumed value - avg. RES)   | 46  |
| Solar                                   | 45  | -   | Electricity, low voltage {DK}  electricity production, <b>photovoltaic</b> , 3kWp slanted-roof installation, single-Si, panel, mounted   Alloc Rec, U | 144   |
| Waste                                   | -   | -   | Electricity, for reuse in municipal waste incineration only {DK}  <b>treatment of municipal solid waste</b> , incineration   Alloc Rec, U             | 500   |
| Wind offshore                           | 12  | -   | Electricity, high voltage {DK}  electricity production, <b>wind</b> , 1-3MW turbine, <b>offshore</b>   Alloc Rec, U                                   | 18  |
| Wind onshore                            | 11  | -   | Electricity, high voltage {DK}  electricity production, <b>wind</b> , 1-3MW turbine, <b>onshore</b>   Alloc Rec, U                                    | 14  |

Figura 10.7: Listagem dos valores de fator de emissão total associados a diversas tecnologias de produção de eletricidade quando contabilizadas as fases de construção e operação. Valores estes apresentados nos inventários do IPCC e Ecoinvent.

Analisando as Figura 10.6 e Figura 10.7 é possível comparar os valores obtidos com os tabelados. Em termos de centrais hidroelétricas, os valores obtidos nesta dissertação para as centrais com albufeira de reserva e a fio de água foram, respetivamente, 42 e 36 g CO<sub>2eq</sub>/kWh, enquanto os valores tabelados para estes tipos de centrais variam, respetivamente, entre 8 e 24, e 5 e 24 g CO<sub>2eq</sub>/kWh. Relativamente às centrais termoelétricas a carvão e a gás natural, os valores calculados foram, respetivamente, 1245 e 395 g CO<sub>2eq</sub>/kWh. Nos inventários da Ecoinvent e IPCC estão referidos vários valores para as centrais a carvão, sendo então utilizados os valores mínimos e máximos associados aos vários tipos de carvão utilizados. Assim, foi considerado que os valores tabelados variam, respetivamente, entre 820 e 1266, e 490 e 529 g CO<sub>2eq</sub>/kWh. Por fim, os valores associados às centrais eólicas e solar fotovoltaicas foram equivalentes a 67 e 32 g CO<sub>2eq</sub>/kWh, e os valores

tabelados apresentam intervalos entre 11 e 14, e 45 e 144  $g\ CO_{2eq}/kWh$ , respetivamente. Analisando todas as tecnologias estudadas nesta dissertação é possível observar que apesar de apenas o valor associado às centrais termoelétricas a carvão estar entre os intervalos tabelado, todas os outros tipos de centrais apresentam valores na mesma ordem de grandeza dos intervalos tabelados transmitindo, assim, uma certa veracidade aos resultados obtidos.

#### 10.4 Análise do mix elétrico português com os valores calculados

Por fim, conhecendo os fatores de emissão direta e total para cada tecnologia estudada e as suas percentagens de produção no *mix* de geração de energia elétrica de Portugal continental em cada ano estudado, é possível calcular o fator de emissão direto e total anual desse mesmo *mix* e, também, os seus respetivos valores médios a partir de uma média ponderada baseada na percentagem que cada tecnologia ocupada na energia elétrica total produzida. A Figura 10.8 possui a variação dos 2 valores referidos acima e dos valores tabelados para o *mix* de geração de energia elétrica de Portugal pela APREN<sup>[R.4]</sup> ao longo do período de tempo estudado, bem como a média de cada um destes conjuntos de valores. A amarelo, o fator de emissão total do *mix* de geração de energia elétrica de Portugal continental tal como calculado nesta dissertação, a azul, foi desenhado o fator de emissão direta do mesmo *mix*, calculado também neste estudo e, por fim, a verde, foram desenhados os valores tabelados pela APREN do fator de emissão para Portugal.

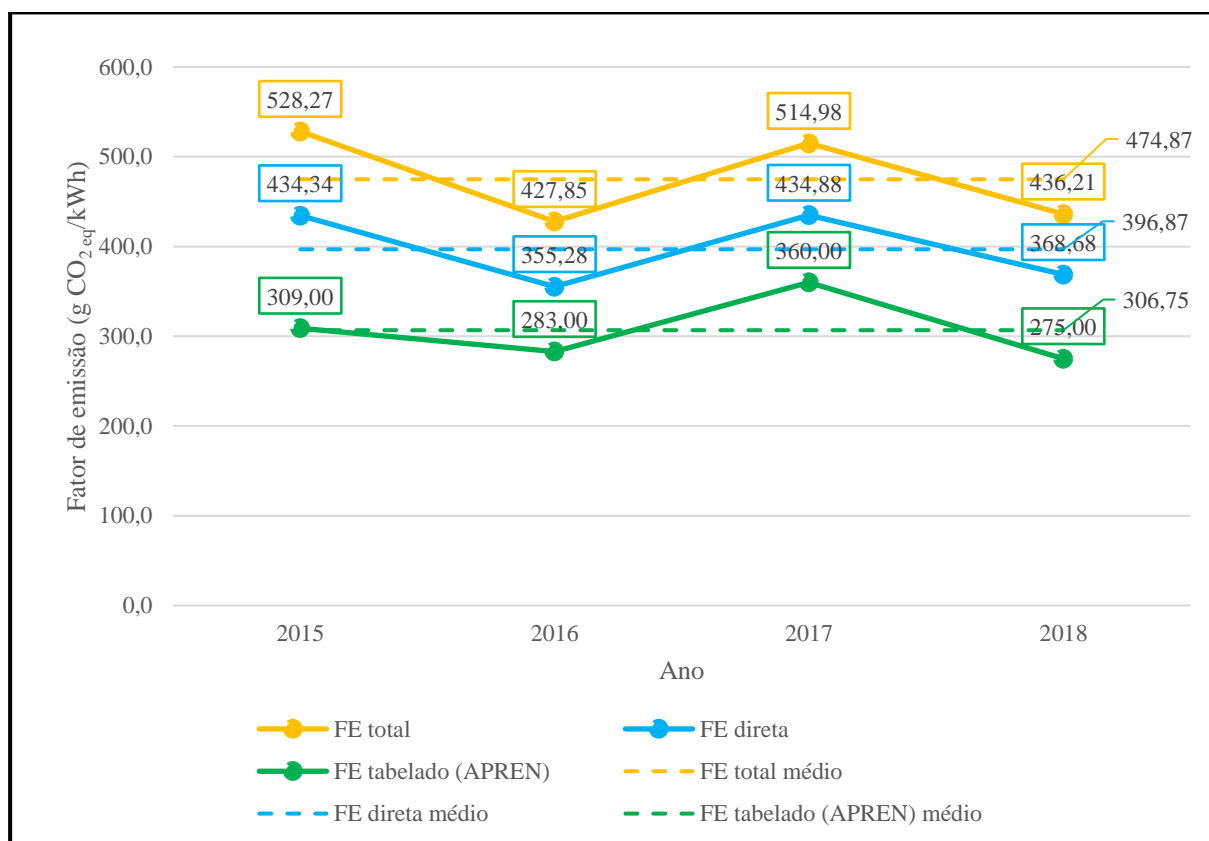


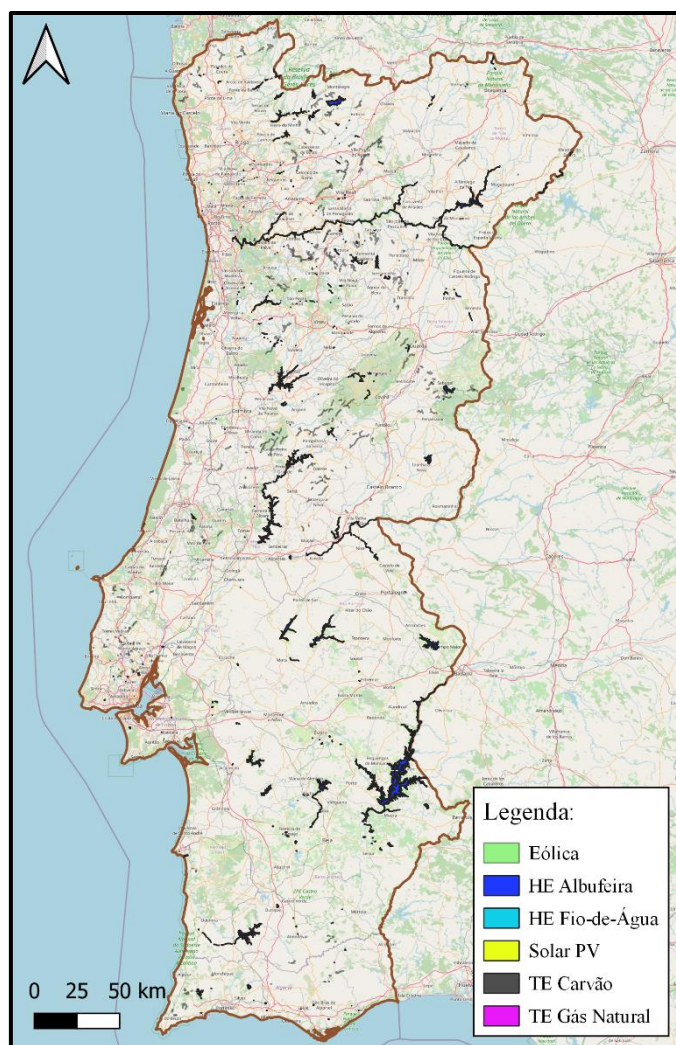
Figura 10.8: Gráfico da evolução do fator de emissão tabelado, direto calculado, e total calculado associado ao mix de geração de energia elétrica de Portugal continental ao longo do período de estudo desta dissertação, 2015 a 2018, inclusive, e os valores médios desses 4 anos.

Analisando a Figura 10.8, denota-se que todas as linhas possuem comportamentos semelhantes ao longo do período de tempo estudado, mas existe uma diferença drástica nos valores das mesmas em cada ano. Em média, seria esperado que o fator de emissão direta calculado fosse semelhante ao fator tabelado

mas este é equivalente a 129% do fator de emissão para o *mix* de geração de energia elétrica de Portugal obtido pela APREN. Tendo isso em conta, é natural observar que também o fator de emissão total é superior ao tabelado, sendo que, em média, este é equivalente a 155% do valor da APREN. Este facto era esperado pois, ao contrário dos outros dois fatores referidos anteriormente, o fator de emissão total inclui todas as emissões anuais produzidas nas fases de construção e operação. Assim, estes valores são muito mais próximos do valor real de emissões para produção de eletricidade em Portugal continental.

### 10.5 Área ocupada

O segundo parâmetro estudado nesta dissertação focou-se na área ocupada para produção de eletricidade. Após o mapeamento de todas as centrais, foi possível visualizar a área total ocupada para produção de energia elétrica no fim de 2018. A Figura 10.9, apresentada abaixo, representa o mapa obtido.



*Figura 10.9: Mapa da área ocupada pelas centrais produtoras de eletricidade estudadas em 2018, correspondente à área total contabilizada nesta dissertação.*

Analisando a Figura 10.9, observa-se que a produção de energia elétrica em Portugal continental está dispersa por toda a sua área embora seja notável um certo nível de centralização no Norte do país muito devido às características geográficas do local que sendo mais montanhoso e com maior taxa de precipitação proporciona melhores condições para a produção de energia a partir de fontes eólicas e hidroelétricas. O Sul sendo mais plano e quente gera melhores condições para o desenvolvimento de

tecnologias solar fotovoltaicas, ainda em expansão quando comparadas com as outras fontes energéticas. As centrais hidroelétricas no Sul do país ocupam grandes áreas embora sejam, também, muito utilizadas para rega e abastecimento de água às localidades. O centro do país apresenta condições intermédias, tendo nas serras do litoral e na serra da Estrela um número elevado de centrais eólicas, existindo, também, uma série de centrais hidroelétricas com albufeira instaladas no rio Tejo e nos seus afluentes.

Após ter sido calculada a área ocupada anualmente por cada tipo de central, foi construída a Figura 10.10, que representa o aglomerado de toda a área ocupada em Portugal continental utilizada para produção de eletricidade nos anos de 2015 a 2018, inclusive.

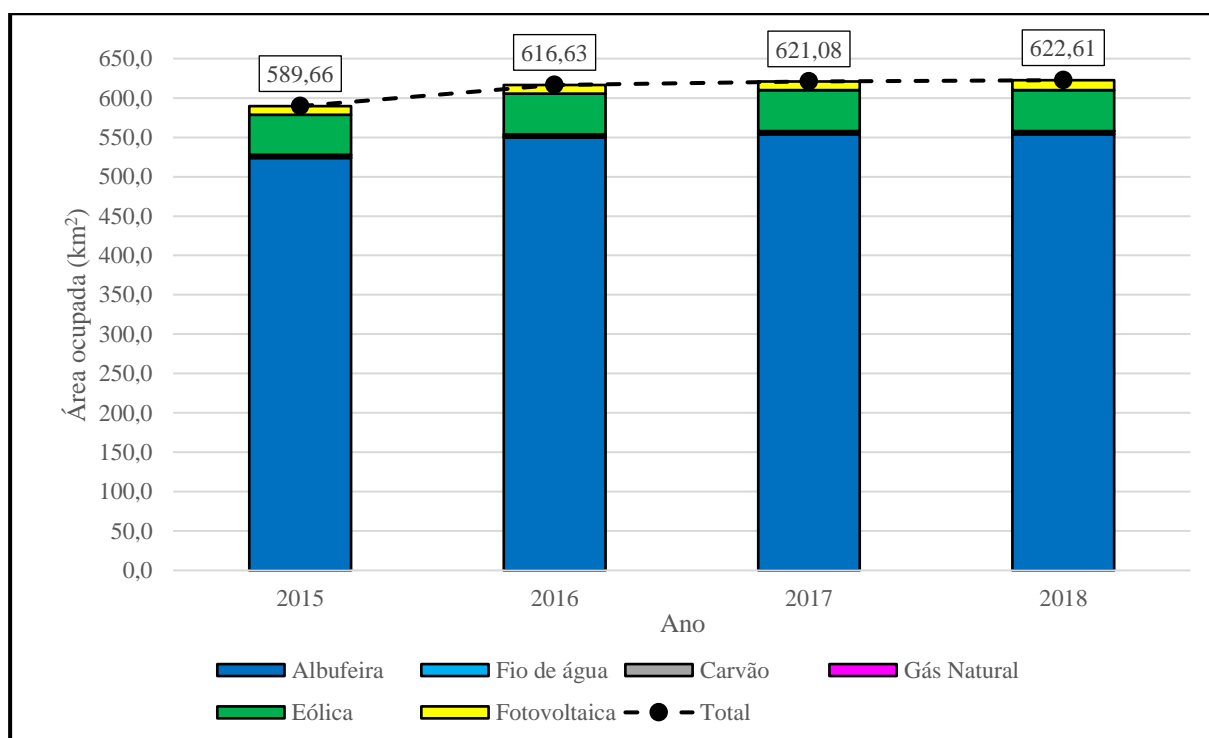


Figura 10.10: Gráfico da evolução da área ocupada para produção de eletricidade em Portugal continental entre 2015 e 2018, inclusive, e a subdivisão desta pelas diversas tecnologias estudadas nesta dissertação.

Tal como é possível observar na Figura 10.10 houve apenas um ligeiro aumento na área total ocupada para produção de eletricidade através da construção de novas centrais ao longo do período estudado equivalente a 6% do valor total de área ocupada para este propósito em 2015. Os diversos tipos de centrais ocupam percentagens diferentes da área total sendo este facto mais perceptível ao analisar o valor médio, equivalente a 612 km<sup>2</sup>, mais detalhadamente, decompondo-o percentualmente pelas diversas tecnologias estudadas.

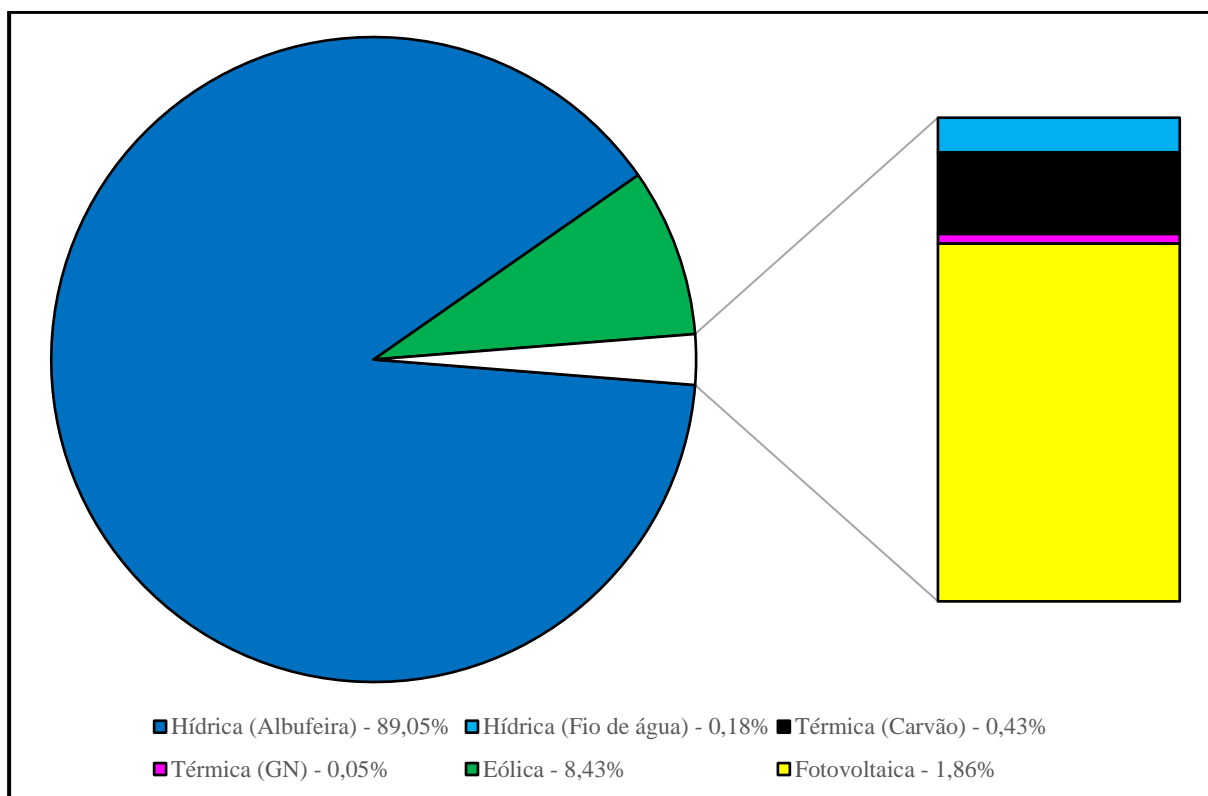


Figura 10.11: Divisão da área total média ocupada pelas diversas tecnologias em estudo nesta dissertação.

A Figura 10.11 demonstra a divisão da área média ocupada para a produção de eletricidade em Portugal continental entre 2015 e 2018. Neste espaço de tempo, as centrais hidroelétricas com albufeira ocupam a grande parte da área total sendo isto esperado visto que estas armazenam grandes quantidades de água como reserva de modo a possibilitarem a produção rápida de energia elétrica quando necessário, o armazenamento da mesma quando existe um excesso de produção, e de modo a salvaguardarem a rede elétrica do país em caso de grandes falhas no sistema produtor. Em segundo lugar, as eólicas ocupam uma percentagem importante da área total devido ao grande número de centrais já existentes que promoveram também a grande penetração desta energia no *mix* de geração de energia elétrica do país. Por último, também é importante referir que tanto as centras termoelétricas a carvão como a gás natural ocupam percentagens extremamente pequenas especialmente quando considerados os valores de eletricidade produzidos por estas.

## 10.6 Análise à área ocupada

Em termos do estudo da razão de área ocupada por potência instalada foi considerado o valor médio obtido devido a este apresentar uma versão mais holística da situação de cada tecnologia durante todo o período de tempo estudado. Este conjunto de valores está representado na Figura 10.12, apresentada abaixo, de modo a comparar as diversas tecnologias.



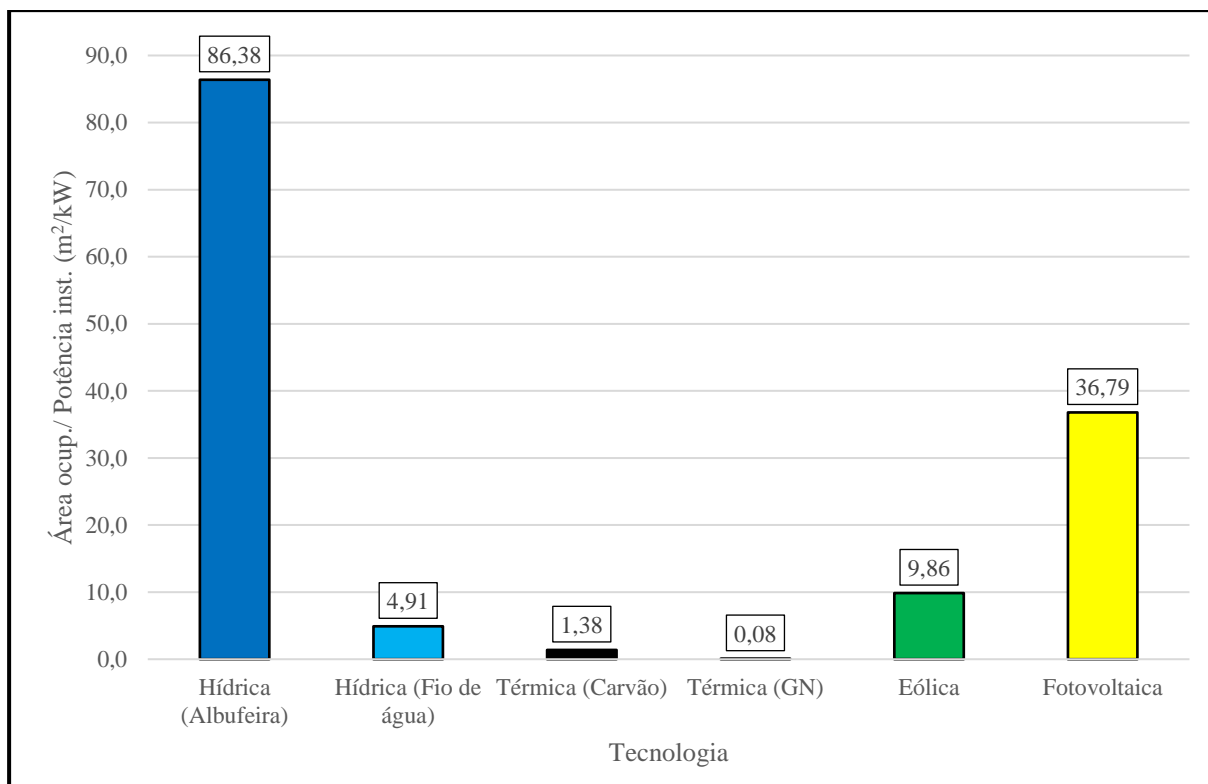


Figura 10.12: Gráfico de comparação entre o valor médio da razão área ocupada/potência instalada associado a cada um dos tipos de centrais estudados nesta dissertação.

Tal como é possível observar, existe uma grande discrepância nos valores médios obtidos para cada tipo de central, onde ambos os tipos de centrais termoelétricas apresentam valores muito inferiores em comparação com as outras tecnologias estudadas. Isto é devido a estas tecnologias possuírem altos valores de potência nominal. Para além disso, nestas centrais, o espaço utilizado para armazenamento do combustível é pequeno pois os combustíveis utilizados têm um alto teor energético. No caso das centrais termoelétricas a gás natural, o valor é muito mais baixo pois parte destas utiliza parte das instalações de centrais vizinhas diminuindo a sua área ocupada. Quantos às centrais com os valores médios mais altos, a centrais hidroelétricas com albufeira e as centrais solar fotovoltaicas pecam por razões opostas, demonstrando uma necessidade de utilizar uma área muito mais elevada para produção da mesma quantidade de energia elétrica. As centrais hidroelétricas com albufeira possuem valores elevados de potência instalada mas, devido a estas utilizarem grandes áreas para armazenamento de água que pode ser utilizada para produção de eletricidade quase instantaneamente, o valor da razão área ocupada/potência instalada torna-se bastante alto. Por outro lado, as centrais solar fotovoltaicas possuem uma potência instalada baixa em comparação com a área ocupada.

Em termos do estudo da razão de área ocupada por eletricidade produzida foi, também, considerado o valor médio obtido no período de tempo em estudo devido a este apresentar uma versão mais holística da situação de cada tipo de central durante todo o período de tempo estudado e pois este permite suavizar as variações existentes nos valores obtidos anualmente. Este conjunto de valores está representado na Figura 10.13 de modo a comparar as diversas tecnologias.

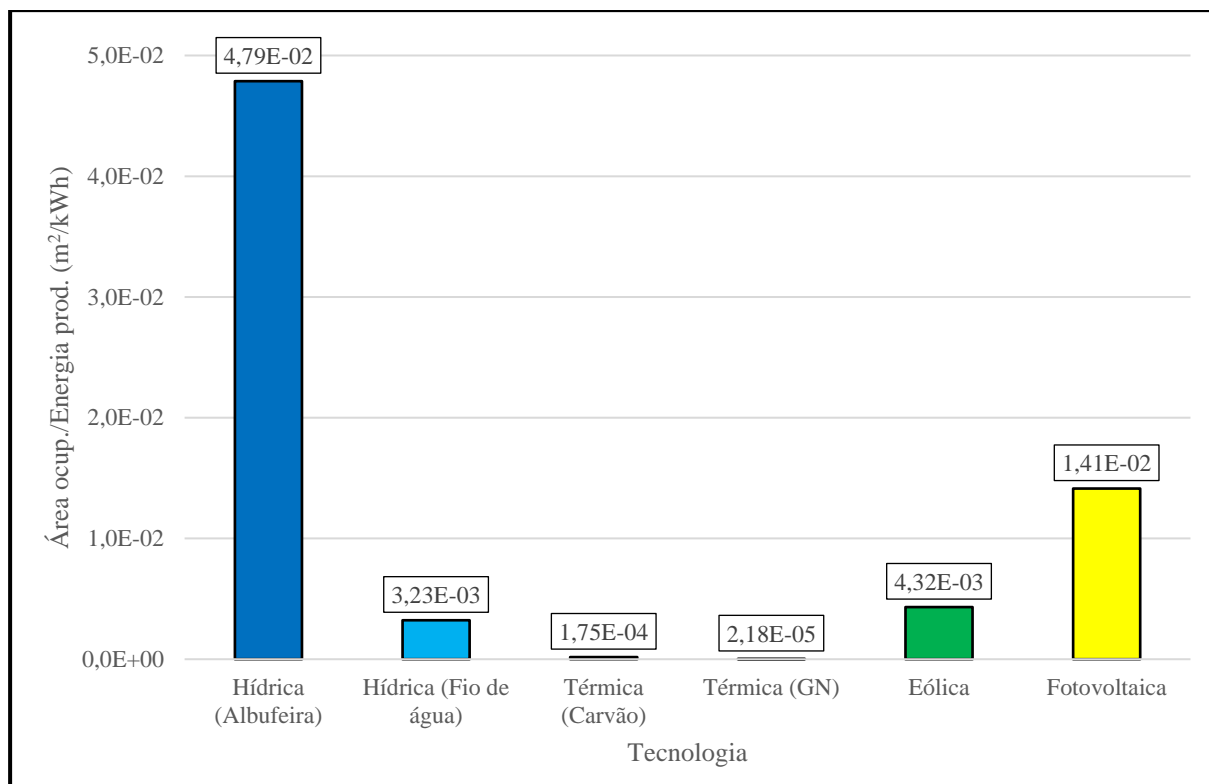


Figura 10.13: Gráfico de comparação entre o valor médio da razão área ocupada/eletricidade produzida associado a cada um dos tipos de centrais estudados nesta dissertação.

Analogamente à razão área ocupada por potência instalada, na Figura 10.13 existe uma grande discrepância nos valores médios obtidos para cada tipo de central. As centrais termoelétricas apresentam valores muito inferiores em comparação com as outras tecnologias estudadas devido a estas possuírem uma área total ocupada muito pequena mas produzindo, em média, quase metade da eletricidade utilizada em Portugal continental. Tal como referido anteriormente, estas centrais necessitam de pouco espaço para armazenar combustível e produzir energia elétrica e as centrais termoelétricas a gás natural utilizam, também, parte das instalações de centrais vizinhas diminuindo de novo a área ocupada por estas. As centrais que não utilizam combustíveis fósseis apresentam valores muito superiores às centrais termoelétricas pois ou não produzem uma percentagem elevada da eletricidade em Portugal continental, como é o caso das centrais hidroelétricas a fio de água ou solar fotovoltaicas, ou, apesar de representarem uma fatia importante do *mix* de geração de energia elétrica, utilizam uma área muito superior às centrais termoelétricas, tal como é o caso das centrais eólicas ou hidroelétricas com albufeira de reserva. Assim, em termo de área ocupada para produção de energia elétrica, as centrais termoelétricas são claramente as melhores, sendo que das duas tecnologias, a que utiliza gás natural apresenta os melhores resultados na ocupação de área por potência instalada e eletricidade produzida.



## 11. Conclusão

Com o aumento das necessidades energéticas e recursos terrestres consumidos atividades humanas e, paralelamente, com a maior consciencialização da necessidade de sustentabilidade tem existido uma mudança do *mix* de geração de energia elétrica com vários incentivos de modo a aumentar a penetração de fontes energéticas renováveis, procurando também construir estes tipos de centrais nos locais mais apropriados de modo a maximizar a eletricidade produzida e ao mesmo tempo minimizar o espaço ocupado por elas. Esta mudança é notada no período de tempo estudado onde, embora o número de centrais que utilizam combustíveis fósseis não tenha diminuído, o número de centrais hidroelétricas, eólicas e solar fotovoltaicas tenha aumentado.

Os valores estatísticos de intensidade carbónica média anual para a produção de eletricidade apenas contabilizam a quantidade de CO<sub>2</sub> emitida diretamente pela queima dos principais combustíveis fósseis utilizados para produção de energia elétrica nas centrais termoelétricas, ignorando assim grandes quantidades deste e de outros gases com efeito de estufa (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, SF<sub>6</sub>) que são emitidos durante todo o ciclo de vida de cada central integrante no *mix* de geração de energia elétrica. Esta dissertação tentou mitigar este facto ao calcular todas as emissões que ocorrem durante as fases de construção e operação do ciclo de vida de cada tipo de central renovável e não renovável, recorrendo a uma pesquisa bibliográfica de centrais reais em países como os Estados Unidos da América, China, ou Brasil, de modo a tentar obter valores mais próximos da realidade. Na fase de construção, as centrais associadas a energias renováveis emitem uma maior quantidade de gases com efeito de estufa comparadas com as suas homólogas associadas a combustíveis fósseis, correspondendo a 98% das emissões totais nesta fase. Na fase de operação houve um reverso nas emissões sendo que são ambos os tipos de centrais termoelétricas que emitem a grande quantidade de gases com efeito de estufa, sendo a produção de eletricidade por estas associada a 99% das emissões totais nesta fase. Para além disso, não só estas emitem valores superiores na fase de operação como emitem, também, valores superiores aos totais obtidos na fase de construção, constituindo assim a grande maioria dos gases com efeito de estufa emitidos para a atmosfera, estudados nesta dissertação. Para além disso, ao conhecer os valores de energia elétrica produzida em Portugal continental, foi possível calcular o fator de emissão para a produção de eletricidade a partir de cada uma destas tecnologias de modo a conseguir atingir dois dos objetivos primários desta dissertação, a obtenção de um fator de emissão total para o *mix* de geração de energia elétrica de Portugal continental e a comparação deste com o fator de emissão tabelado para o mesmo *mix*.

Numa tentativa de obter confirmação relativamente à veracidade dos valores obtidos para os fatores de emissão, foi feita uma comparação destes com valores tabelados nos inventários do IPCC e Ecoinvent. Nesta comparação foi obtido que embora muitos dos valores estejam acima dos intervalos tabelados, à exceção do fator de emissão para as centrais termoelétricas a carvão e a gás natural que se encontravam dentro e abaixo do intervalo, respetivamente, todos os valores encontravam-se na mesma ordem de grandeza dos valores tabelados.

Tal como referido anteriormente, o fator de emissão tabelado apenas contabiliza as emissões diretas da queima dos combustíveis fósseis principais nas centrais termoelétricas. Assim, de modo a obter uma comparação direta com este valor, foi também calculado um fator de emissão, intitulado de fator de emissão direta, utilizando os mesmos métodos do fator tabelado. Para o período de tempo compreendido entre 2015 e 2018, o fator de emissão médio tabelado para o *mix* de geração de energia elétrica de Portugal continental é equivalente a 307 g CO<sub>2</sub>/kWh. Para uma comparação justa, o fator de emissão direta calculado para o mesmo *mix* é de 397 g CO<sub>2eq</sub>/kWh, o que equivale a 129% do valor tabelado.

O valor médio do fator de emissão total calculado para o mesmo *mix* em estudo é de  $475 \text{ g CO}_{2eq}/kWh$ , sendo equivalente a 155% do valor tabelado. Com os valores obtidos é possível observar que os valores tabelados correspondem apenas a cerca de 65% das emissões contabilizadas nos fatores de emissão, provando a importância de expandir o cálculo deste importante medidor de consciencialização ambiental a todas as emissões produzidas na construção de centrais e produção de eletricidade a partir das mesmas de modo a obter valores mais próximos da realidade.

Em termos de organização do território, é cada vez mais importante estudar o solo de modo a designar o melhor uso deste, visto que este também é um recurso finito e, num Mundo onde a população e o desenvolvimento social continuam a subir, despoletando crescimentos necessários na produção agrícola, industrial e energética, e um crescimento na área habitacional necessária para suportar essa mesma crescente população, o solo torna-se também um recurso escasso que merece atenção de modo a que o seu uso seja o mais eficiente possível. Visto não existir um acesso fácil a dados relativos à área ocupada para produção de eletricidade disponível ao público, esta dissertação procurou colmatar essa falha, através do programa qGIS, um programa de informação geográfica, e imagens de satélite, assumindo o perímetro pertencente a cada central, mapeando-o, e obtendo como resultado a área de cada uma das centrais em estudo. No início do estudo era esperado que a produção de eletricidade ocupasse uma extensa área de Portugal continental mas, ao contrário do esperado, a área total ocupada por todas as centrais estudadas nesta dissertação é apenas equivalente a  $623 \text{ km}^2$ , apenas 0,7% da área total de Portugal continental, o que equivale a uma área ligeiramente inferior ao município de Pombal, Leiria, com uma área de  $626 \text{ km}^2$  ou a 87200 campos de futebol com dimensões de  $105 \times 68 \text{ m}$ . Embora este facto pareça diminuir a relevância da questão do ordenamento do território, é possível que esta questão continue a ser importante em casos pontuais na decisão de qual é o melhor aproveitamento para um certo espaço.

Os dois fatores calculados nesta dissertação tiveram em conta a área ocupada por potência instalada e por eletricidade produzida. Destes dois fatores, a razão entre a área ocupada e a eletricidade produzida tem menor importância para projetos futuros pois é muito dependente no *mix* de geração de energia elétrica existente num dado ano estudado, funcionando mais como uma representação do nível de uso de uma unidade de área num determinado ano. Por sua vez a razão entre a área ocupada e a potência instalada permite observar em simultâneo várias alterações na estrutura de produção de energia elétrica tal como, por exemplo, a evolução de uma dada tecnologia ou o encerramento de certas centrais, sendo que estas duas alterações vão, em princípio, causar uma diminuição no valor obtido através da instalação de centrais mais recentes, com uma eficiência mais elevada, ou fechando centrais com eficiências mais baixas, o que permitirá a instalação de uma maior potência numa dada área. Nas duas razões foi observada a dominância das centrais termoelétricas, especialmente as centrais a gás natural, pois estas apresentam os valores mais baixos de área ocupada tanto por potência instalada como por eletricidade produzida. Estes dois tipos de centrais têm a vantagem de conseguirem armazenar grandes quantidades de combustível numa área relativamente pequena, ganhando, assim, vantagem às centrais hidroelétricas com albufeira, pois estas requerem grandes área para armazenar água, e às centrais eólicas, solar fotovoltaicas e hidroelétricas a fio de água, pois estas não possuem capacidade de armazenamento da fonte energética utilizada por elas, tendo, também, um espectro de regularização de energia elétrica produzida inferior às centrais termoelétricas. Assim, tendo em conta unicamente os fatores associados à área ocupada para produção de eletricidade, os valores calculados nesta dissertação indicam que as centrais termoelétricas a gás natural representam a melhor opção para produção de energia elétrica.

Em suma, nesta dissertação foi comprovada a importância da inclusão das emissões associadas às fontes existentes nas fases de construção e operação que, normalmente, são ignoradas no cálculo do fator de emissão do *mix* de geração de energia elétrica de Portugal continental apresentado ao público pois estas

acabam por representar uma grande parcela das emissões totais calculadas. Em termos de área foram obtidos 2 valores de comparação entre os diversos tipos de centrais, sendo que o que compara a potência instalada com a área ocupada aparenta ser mais útil e fiável.

### 11.1 Desenvolvimentos futuros

Embora tenha existido uma aproximação dos valores obtidos aos valores reais de emissão de gases com efeito de estufa associados à produção de energia elétrica, estes ainda podem ser melhorados. Tendo em conta que foram apenas estudadas 2 das 3 fases de vida de uma central, o estudo da fase em falta, associada ao fecho, desmantelamento e reutilização do espaço ocupado pela central, irá completar a análise do ciclo de vida das centrais e calcular o impacto total destas na emissão de gases com efeito de estufa. Para além disso, a utilização de um maior número de estudos permitirá obter valores de emissão mais próximos da realidade, não penalizando qualquer tipo de central estudado. Relativamente aos fatores de emissão associados a cada um dos materiais utilizados, será importante a inclusão das emissões produzidas nos transportes destes materiais até às várias centrais, de modo a obter valores totais dos impactos de cada um destes nas emissões associadas a cada tecnologia em estudo. A reestruturação da alocação da energia elétrica produzida pelas diversas tecnologias estudadas pode, também, ser alterada de modo a incluir outras tecnologias presentes em Portugal, que não foram contabilizadas neste estudo, como por exemplo a biomassa.

Outra possibilidade de melhoramento do estudo feito envolve a utilização de valores fiáveis de energia elétrica produzida obtidos através das empresas responsáveis pela produção de eletricidade de modo a obter valores de emissão na fase de operação mais realistas pois neste estudo foi feita uma divisão da energia elétrica produzida através da potência instalada, assumindo, entre outros fatores, valores de eficiência iguais em todas as centrais com valores desconhecidos, o que não acontece na realidade. A utilização dos valores reais poderá alterar bastante os valores de emissão de gases com efeito de estufa pois a eficiência das centrais do mesmo tipo pode ser influenciada por fatores externos como por exemplo, a sua localização. Uma mudança no sistema de análise de valores de base anual para uma base diária, semanal ou mensal poderá, também, permitir uma observação das variações nos valores de eletricidade e emissões produzidas ao longo do ano, sendo possível visualizar padrões e alterações sazonais.

Relativamente à área geográfica, com a utilização de valores de área ocupada fornecidos pelas empresas promotoras ou a utilização de imagens de satélite e ortofotomapas, que permitam um maior grau de precisão na vetorização das áreas ocupadas pelas centrais elétricas, será possível obter valores mais próximos da realidade pois estes dois métodos permitiram conhecer melhor o perímetro real das centrais em estudo. Os valores que mais beneficiaram deste estudo serão as centrais termoelétricas a gás natural pois estas utilizam parte das instalações de centrais vizinhas, alterando, assim, os valores calculados para as razões área ocupada/potência instalada e área ocupada/eletricidade produzida.

Com a evolução esperada do *mix* de geração de energia elétrica, impulsionada pelos desejos de grande parte dos países do Mundo em diminuir as suas emissões de gases com efeito de estufa de modo a tentar controlar novamente as alterações climáticas que se têm sentido nas últimas décadas, é, também, esperado que exista cada vez mais uma combinação entre o aumento da utilização de fontes energéticas renováveis e a diminuição da utilização de fontes não renováveis. As segundas apresentam emissões de gases com efeito de estufa muito superiores, sendo esperado que a utilização destas seja cada vez menor ou que a sua utilização destas centrais se foque numa diminuição das emissões estudadas neste estudo, ao alterar o combustível utilizado. Ao longo do século XX já foi observada a transição da utilização do carvão para o petróleo como fonte de energia e já no século XXI começa a ser observada a transição

para o gás natural, mostrando, assim, a procura por um combustível menos poluente. Tal como visto neste estudo, apesar de não existirem dados referente ao petróleo, a transição de carvão para gás natural representa uma diminuição do fator de emissão de 1245 para 395  $g\ CO_{2eq}/kWh$ . Apesar do aumento da penetração de centrais que utilizam fontes renováveis no *mix* de geração de energia elétrica, o facto da maior parte destas não permitir o armazenamento da fonte energética utilizada implica que, atualmente, a eletricidade produzida por estas tem de ser consumida imediatamente ou armazenada em baterias. Outra solução para este problema envolve a implementação de centrais virtuais, ou seja, uma combinação de vários tipos de centrais, sendo os sistemas mais comuns os que incluem centrais hidroelétricas com albufeira e eólicas, ou hidroelétricas com albufeira, eólicas e solar fotovoltaicas, permitindo a combinação entre a capacidade de armazenamento das centrais hidroelétricas com albufeira e a produção de energia elétrica pelos outros dois tipos de centrais, especialmente as centrais eólicas que, ao produzirem eletricidade durante a noite, permitem sustentar as necessidades energéticas do bombeamento de água para as albufeiras de modo a produzir energia elétrica de modo mais consistente nas horas de cheia e de ponta.

Embora seja esperado que tanto entre o aumento da utilização de fontes energéticas renováveis e a diminuição da utilização de fontes não renováveis, altere significativamente o *mix* de geração de energia elétrica existem limites para estas alterações. Notavelmente, as centrais eólicas já possuem uma larga distribuição pelo país e, devido a isso, o número de locais economicamente viáveis começa a diminuir o país a chegar à potência máxima instalável. Assim, no futuro, deve ser procurada a renovação das centrais mais antigas, instalando turbinas mais eficientes. Existe, também, uma procura de uma rede elétrica 100% sustentada por fontes energéticas renováveis mas sendo extremamente difícil a implementação desse tipo de rede, no futuro, a utilização do hidrogénio apresenta uma perspetiva extremamente interessante como o futuro vetor energético dominante devido ao seu alto valor calorífico e à não existência de emissões diretas associadas à utilização deste.

## Referências

- [R.1] – UNFCCC - **What is the Kyoto Protocol?** [Online], 2015. [Consultado a 5 Dez. 2020]. Disponível em: [https://unfccc.int/kyoto\\_protocol](https://unfccc.int/kyoto_protocol);
- [R.2] – EUROPEAN COMMISSION - **Paris Agreement** [Online], 2016. [Consultado a 5 Dez. 2020]. Disponível em: [https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_en);
- [R.3] – EEA - **Greenhouse gas emission intensity of electricity generation in Europe** [Online], 8 Dez. 2020. [Consultado a 14 dez. 2020]. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/overview-of-the-electricity-production-3/assessment>;
- [R.4] – APREN - **Intensidade Energética da Economia, em Portugal e na UE-28** [Online], 2020. [Consultado a 27 Jul. 2020]. Disponível em: <https://www.apren.pt/pt/energias-renovaveis/outros>;
- [R.5] – E2P - **Base de dados de fontes renováveis de energia** [Online], atualizado 2019. [Consultado a 27 Ago. 2020]. Disponível em: <http://e2p.inegi.up.pt/?Lang=PT>;
- [R.6] – REN - **Estatística Mensal** [Online], 2008. [Consultado 6 Out. 2019]. Disponível em: <https://www.centrodeinformacao.ren.pt/PT/InformacaoExploracao/Paginas/EstatisticaMensual.aspx>;
- [R.7] – EDP Produção – **Declaração ambiental 2017 – Centro de Produção Cávado-Lima** [Online]. Dez. 2018, págs. 16-34 e 70. [Consultado a 2 Out. 2019]. Disponível em: <https://portugal.edp.com/sites/default/files/2020-11/Declarac%CC%A7a%CC%83o%20Ambiental%20Ca%CC%81vado-Lima%20Ciclo%202017-2019.zip>;
- [R.8] – EDP Produção – **Declaração ambiental 2018 – Centro de Produção Cávado-Lima** [Online]. Set. 2019, págs. 16-31 e 68. [Consultado a 2 Out. 2019]. Disponível em: <https://portugal.edp.com/sites/default/files/2020-11/Declarac%CC%A7a%CC%83o%20Ambiental%20Ca%CC%81vado-Lima%20Ciclo%202017-2019.zip>;
- [R.9] – EDP Produção – **Declaração ambiental 2017 – Centro de Produção Douro** [Online]. Dez. 2018, págs. 16-32 e 68. [Consultado a 2 Nov. 2019]. Disponível em: <https://portugal.edp.com/sites/default/files/2020-11/Declaracao%20Ambiental%20Douro%20Ciclo%202017-2019.zip>;
- [R.10] – EDP Produção – **Declaração ambiental 2018 – Centro de Produção Douro** [Online]. Out. 2019, págs. 16-32 e 66. [Consultado a 2 Nov. 2019]. Disponível em: <https://portugal.edp.com/sites/default/files/2020-11/Declaracao%20Ambiental%20Douro%20Ciclo%202017-2019.zip>;
- [R.11] – EDP Produção – **Declaração ambiental 2017 – Centro de Produção Tejo-Mondego** [Online]. Dez. 2018, págs. 16-37 e 74. [Consultado a 2 Nov. 2019]. Disponível em: <https://portugal.edp.com/sites/default/files/2020-10/Declaracao%20Ambiental%20Tejo%20Mondego%20Ciclo%202017-2019.zip>;
- [R.12] – EDP Produção – **Declaração ambiental 2018 – Centro de Produção Tejo-Mondego** [Online]. Set. 2019, págs. 16-37 e 74. [Consultado a 2 Nov. 2019]. Disponível em: <https://portugal.edp.com/sites/default/files/2020-10/Declaracao%20Ambiental%20Tejo%20Mondego%20Ciclo%202017-2019.zip>;

- [R.13] – EDP Produção – **Declaração ambiental 2017 – Central Termoelétrica de Sines** [Online]. Mai. 2018, págs. 46-50. [Consultado a 2 Nov. 2019]. Disponível em: [https://www.edp.com/sites/default/files/declaracao\\_ambiental\\_2017\\_sines.pdf](https://www.edp.com/sites/default/files/declaracao_ambiental_2017_sines.pdf);
- [R.14] – EDP Produção – **Declaração ambiental 2018 – Central Termoelétrica de Sines** [Online]. Out. 2019, págs. 46-50. [Consultado a 2 Nov. 2019]. Disponível em: [https://www.edp.com/sites/default/files/declaracao\\_ambiental\\_2018\\_sines.pdf](https://www.edp.com/sites/default/files/declaracao_ambiental_2018_sines.pdf);
- [R.15] – EDP Produção – **Declaração ambiental 2017 – Central Termoelétrica de Lares, Central Termoelétrica do Ribatejo** [Online]. 2018, pág. 48-50. [Consultado a 2 Nov. 2019]. Disponível em: <https://emas.apambiente.pt/sites/default/files/files/emas/declaracoes/da2017-lares-e-ribatejo-v2.pdf>;
- [R.16] – EDP Produção – **Declaração ambiental 2018 – Central Termoelétrica de Lares, Central Termoelétrica do Ribatejo** [Online]. Set. 2019, pág. 48-50. [Consultado a 2 Nov. 2019]. Disponível em: [https://www.edp.com/sites/default/files/declaracao\\_ambiental\\_2018\\_dcc-compressed.pdf](https://www.edp.com/sites/default/files/declaracao_ambiental_2018_dcc-compressed.pdf);
- [R.17] – SPATH, P. L.; MANN, M. K.; KERR, D. R. - **Life Cycle Assessment of Coal-fired Power Production** [Online]. Relatório NREL/TP-570-25119, 12100, 1 Set. 1999, págs. 9-11 e 24. [Consultado a 6 Out. 2019]. Disponível em: <http://www.osti.gov/servlets/purl/12100/>;
- [R.18] – SPATH, P. L.; MANN, M. K. - **Life Cycle Assessment of a Natural Gas Combined Cycle Power Generation System** [Online] Relatório NREL/TP-570-27715, 776930, 27 Dez 2000, pág. 8. [Consultado a 8 Out. 2019]. Disponível em: <http://www.osti.gov/servlets/purl/776930/>;
- [R.19] – DONES, R.; BAUER, C.; BOLLIGER, R.; BURGER, B.; HECK, T.; RÖDER, A.; EMMENEGGER, M. F.; FRISCHKNECHT, R.; JUNGBLUTH, N.; TUCHSCHMID, M. - **Life Cycle Inventories of Energy Systems: Results for Current Systems in Switzerland and other UCTE Countries** [Online]. Relatório Ecoinvent 5, 2007, pág. 54, tabela 6.12. [Consultado em 6 Out. 2019]. Disponível em: [http://ecolo.org/documents/documents\\_in\\_english/Life-cycle-analysis-PSI-05.pdf](http://ecolo.org/documents/documents_in_english/Life-cycle-analysis-PSI-05.pdf)
- [R.20] – City of Winnipeg - **Request For Proposal For Professional Consulting Services for SEWPCC Upgrading/Expansion Project** [Online]. RFP 682-2012, 2012, apêndice H. [Consultado a 8 Out. 2019]. Disponível em: [https://www.winnipeg.ca/finance/findata/matmgt/documents/2012/682-2012/682-2012\\_Appendix\\_H-WSTP\\_South\\_End\\_Plant\\_Process\\_Selection\\_Report/Appendix%207.pdf](https://www.winnipeg.ca/finance/findata/matmgt/documents/2012/682-2012/682-2012_Appendix_H-WSTP_South_End_Plant_Process_Selection_Report/Appendix%207.pdf);
- [R.21] – CLAUSS, J.; STINNER, S.; SOLLI, C.; LINDBERG, K. B.; MADSEN, H.; GEORGES, L. - **A generic methodology to evaluate hourly average CO<sub>2</sub>eq. intensities of the electricity mix to deploy the energy flexibility potential of Norwegian buildings** [Online]. 12 Dez. 2018, pág. 6, tabela 1. [Consultado a 19 Nov. 2020]. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/329809903\\_A\\_generic\\_methodology\\_to\\_evaluate\\_hourly\\_average\\_CO<sub>2</sub>eq\\_intensities\\_of\\_the\\_electricity\\_mix\\_to\\_deploy\\_the\\_energy\\_flexibility\\_potential\\_of\\_Norwegian\\_buildings](https://www.researchgate.net/publication/329809903_A_generic_methodology_to_evaluate_hourly_average_CO2eq_intensities_of_the_electricity_mix_to_deploy_the_energy_flexibility_potential_of_Norwegian_buildings)
- [R.22] – WEI, L.; LI, J.; GUO, J.; BAO, Z.; FU, L.; HOU, B. - **The Effect of Precipitation on Hydropower Generation Capacity: A Perspective of Climate Change**. *Frontiers in Earth Science* [Online]. 8 Set. 2020, pág. 12. [Consultado a 25 Nov. 2020]. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2020.00268/full>;
- [R.23] – PERERA, Anushka; RATHNAYAKE, Upaka - **Relationships between Hydropower Generation and Rainfall-Gauged and Ungauged Catchments from Sri Lanka**. *Mathematical*

Problems in Engineering [Online]. 27 Jul. 2020, pág. 6. [Consultado a 25 Nov. 2020]. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2020/9650251/>;

[R.24] – ZHANG, Q.; KARNEY, B.; MACLEAN, H. L.; FENG, J. - **Life-Cycle Inventory of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions for Two Hydropower Projects in China**. Journal of Infrastructure Systems [Online]. Dec. 2007, pág. 273, tabelas 1 e 2. [Consultado em 20 Ago. 2019]. Disponível em: <http://hydratex.com/wp-content/uploads/2014/03/hydrochina.pdf>;

[R.25] – FLURRY, Karin; FRISCHKNECHT, Rolf - **Life Cycle Inventories of Hydroelectric Power Generation** [Online]. 10 Jul. 2012, págs. 11 (Tabela 2.5), 14-17, 29 e 30. [Consultado a 20 Abr. 2019]. Disponível em: <http://esu-services.ch/fileadmin/download/publicLCI/flury-2012-hydroelectric-power-generation.pdf>;

[R.26] – GHG Protocol – **Global Warming Potential Values** [Online]. 16 Feb. 2016, págs. 1 e 3. [Consultado a 12 Out. 2019]. Disponível em: [https://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%20%28Feb%2016%202016%29\\_1.pdf](https://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%20%28Feb%2016%202016%29_1.pdf);

[R.27] – Instituto Nacional de Estatística – **Portugal em Números 2018** [Online]. 2019, pág. 3. [Consultado a 2 Set. 2020]. Disponível em: [https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine\\_publicacoes&PUBLICACOESpub\\_boui=277197091&PUBLICACOESmodo=2](https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_publicacoes&PUBLICACOESpub_boui=277197091&PUBLICACOESmodo=2);

[R.28] – VERÁN-LEIGH, Daniel; VÁZQUEZ-ROWE, Ian - **Life cycle assessment of run-of-river hydropower plants in the Peruvian Andes: a policy support perspective**. The International Journal of Life Cycle Assessment [Online]. 8 Jan. 2019, tabela 2 e 3. [Consultado a 14 Jun. 2019]. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-018-01579-2>;

[R.29] – BHAT, Varun I. K.; PRAKASH, Ravi - **Life Cycle Analysis of Run-of River Small Hydro Power Plants in India**. The Open Renewable Energy Journal [Online]. 2018, págs. 12 (tabela 3) e 13 (tabelas 4 e 5). [Consultado a 14 Jun. 2019]. Disponível em: <https://benthamopen.com/contents/pdf/TOREJ/TOREJ-1-11.pdf>;

[R.30] – KOORNNEEF, J.; KEULEN, T. V.; FAAL, A.; TURKENBURG, W. - **Life cycle assessment of a pulverized coal power plant with post-combustion capture, transport and storage of CO<sub>2</sub>**. International Journal of Greenhouse Gas Control [Online]. 23 Jul. 2008, apêndice B. [Consultado a 9 Set. 2019]. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1750583608000571>;

[R.31] – YUJIA, Wu; ZHAOFENG, Xu; ZHENG, Li - **Lifecycle Analysis of Coal-fired Power Plants with CCS in China**. Energy Procedia [Online]. 2014, tabela 6. [Consultado a 9 Set. 2019]. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187661021402596X>;

[R.32] – MEIER, Paul - **Life-cycle assessment of electricity generation systems and applications for climate change policy analysis** [Online]. Ago. 2002, pág. 39 (tabela 10). [Consultado a 12 Jan. 2020]. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/252186255\\_Life-cycle\\_assessment\\_of\\_electricity\\_generation\\_systems\\_and\\_applications\\_for\\_climate\\_change\\_policy\\_analysis](https://www.researchgate.net/publication/252186255_Life-cycle_assessment_of_electricity_generation_systems_and_applications_for_climate_change_policy_analysis);

[R.33] – OEBELS, K. B.; PACCA, Sergio - **Life cycle assessment of an onshore wind farm located at the northeastern coast of Brazil**. Renewable Energy [Online]. 5 Dec. 2012, pág. 63 e apêndice 1. [Consultado a 10 Mar. 2020]. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148112006714?via%3Dihub>;



- [R.34] – BONOU, Alexandra; LAURENT, Alexis; OLSEN, S. I. - **Life cycle assessment of onshore and offshore wind energy- From theory to application**. *Applied Energy* [Online]. 4 Ago. 2016, pág. 329 (tabela 1 e 2). [Consultado a 12 Mar. 2020]. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261916309990>;
- [R.35] – GARRETT, Peter - **Life Cycle Assessment of Electricity Production From an Onshore V112-3.3 MW Wind Plant** [Online]. 18 Dec. 2015, págs. 32, 44 e 45 (tabela 6). [Consultado a 13 Mar. 2020]. Disponível em: <https://www.vestas.com/~media/vestas/about/sustainability/pdfs/lcav11020mw181215.pdf>;
- [R.36] – FU, Yinyin; LIU, Xin; YUAN, Zengwei - **Life-cycle assessment of multi-crystalline photovoltaic (PV) systems in China**. *Journal of Cleaner Production* [Online]. 23 Jul. 2014, págs. 4 e 5 (tabela 2). [Consultado a 8 Abr. 2020]. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652614007859>;
- [R.37] – MARIMUTHU, C. - **Energy economic and carbon payback period for the renewable energy projects in India** [Online]. Jul. 2014, págs. 109 e 110 (tabelas 5.2 e 5.3). [Consultado a 12 Abr. 2020]. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10603/218883>;
- [R.38] –V. FTHENAKIS, H. C. KIM, R. FRISCHKNECHT, M. RAUGEI, P. SINHA, M. STUCKI - **Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems** [Online]. 15 Mar. 2015, pág. 43 (tabela 5.3.2). [Consultado a 15 Abr. 2020]. Disponível em: [http://www.clca.columbia.edu/Task12\\_LCI\\_LCA\\_10\\_21\\_Final\\_Report.pdf](http://www.clca.columbia.edu/Task12_LCI_LCA_10_21_Final_Report.pdf);
- [R.39] – IPCC - **EFDB – Emission Factor Database** [Online]. 2019. [Consultado a 18 Abr. 2020]. Disponível em: [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/find\\_ef.php?](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/find_ef.php?);
- [R.40] – RAHMAN, M. M.; SALEHIN, S.; AHMED, S. S. U.; SADRUL ISLAM, A. K. M. – **Environmental Impact Assessment of Different Renewable Energy Resources: A Recent Development**. *Clean Energy for Sustainable Development* [Online]. 2017, pág. 39 (Tabela 2.8). [Consultado a 8 Out. 2019]. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128054239000028>;
- [R.41] – EDWARDS, R.; LARIVÉ, J.; RICKEARD, D; WEINDORF, W. - **Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context** [Online]. 2013. [Consultado a 15 Jan. 2020]. Disponível em: [https://ec.europa.eu/jrc/sites/jrcsh/files/wtt\\_appendix\\_4\\_v4\\_july\\_2013\\_final2.pdf](https://ec.europa.eu/jrc/sites/jrcsh/files/wtt_appendix_4_v4_july_2013_final2.pdf);
- [R.42] – EPA – **Locating and Estimating Air Emissions From Sources of Chromium** [Online]. 1984, pág. 33 (Tabela 6). [Consultado a 31 Jan. 2020]. Disponível em: <https://www3.epa.gov/ttnchie1/le/chromium.pdf>;
- [R.43] – EPA - **AP 42, Fifth Edition, Volume I Chapter 12: Metallurgical Industry** [Online], Jan. 1995, Seção 12.5, tabela 12.5-1. [Consultado a 31 Jan. 2020]. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2020-11/documents/c12s05.pdf>;
- [R.44] – EPA – **Locating and Estimating Air Emissions From Sources of Manganese** [Online]. Mar. 1984, Tabela 4-2. [Consultado a 31 Jan. 2020]. Disponível em: <https://www3.epa.gov/ttnchie1/le/manganes.pdf>;
- [R.45] – EPA – **National Emissions Inventory of Sources and Emissions of Molybdenum** [Online]. Mai. 1973, Tabela I. [Consultado a 31 Jan. 2020]. Disponível em: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/2000LPCH.txt?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index>



=Prior%20to%201976&Docs=&Query=%28emission%20factor%29%20OR%20FNAME%3D%222000LPCH.txt%22%20AND%20FNAME%3D%222000LPCH.txt%22&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&UseQField=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5CZYFILES%5CINDE X%20DATA%5C70THRU75%5CTXT%5C00000001%5C2000LPCH.txt&User=ANONYMOUS&P assword=anonymous&SortMethod=h%7C-  
&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Displa y=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page& MaximumPages=1&ZyEntry=15&SeekPage=f;

[R.46] – MONSEN, B.; LINDSTAD, T.; TUSET, J. - **CO<sub>2</sub> Emissions from the Production of Ferrosilicon and Silicon metal in Norway** [Online]. Nov. 1998, Tabela XI. [Consultado a 31 Jan. 2020]. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/311440469\\_CO2\\_Emissions\\_from\\_the\\_Production\\_of\\_Ferrosilicon\\_and\\_Silicon\\_metal\\_in\\_Norway](https://www.researchgate.net/publication/311440469_CO2_Emissions_from_the_Production_of_Ferrosilicon_and_Silicon_metal_in_Norway);

[R.47] – Organização Mundial da Saúde – **Air Quality Guidelines for Europe** [Online]. 2000, capítulo 6.12, pág. 1. [Consultado a 31 Jan. 2020]. Disponível em: [http://www.euro.who.int/\\_data/assets/pdf\\_file/0016/123082/AQG2ndEd\\_6\\_12vanadium.PDF](http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0016/123082/AQG2ndEd_6_12vanadium.PDF);

[R.48] – NAKANO, K.; SHIBAHARA, N.; NAKI, T.; SHINTANI, K.; KOMATA, H.; IWAOKA, M.; HATTORI, N. - **Greenhouse gas emissions from round wood production in Japan**. *Journal of Cleaner Production* [Online]. 7 Out. 2016, pág. 6 e 7. [Consultado a 31 Jan. 2020]. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652616316225>;

[R.49] – Ecofys – **Methodology for the Free Allocation of Emission Allowances in the EU ETS Post 2012 – Sector Report for the Ceramics Industry** [Online]. Nov. 2009, Tabela 13. [Consultado a 31 Jan. 2020]. Disponível em: [https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/ets/allowances/docs/bm\\_study-ceramics\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/ets/allowances/docs/bm_study-ceramics_en.pdf);

[R.50] – JIN, H.; AFIUNY, P.; MCINTYRE, T.; YIH, Y.; SUTHERLAND, J. W. - **Comparative Life Cycle Assessment of NdFeB Magnets: Virgin Production versus Magnet-to-Magnet Recycling**. *Procedia CIRP* [Online]. 2016, Tabela 3. [Consultado a 31 Jan. 2020]. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827116006508>;

[R.51] – SAIF, S. FERROZ, A.; KHAN, M. A.; MEHMOOD, A. - **Calculation and Estimation of the Carbon Footprint of Paint Industry**. *Nature Environment and Pollution Technology* [Online]. 2015, tabela 5. [Consultado a 31 Jan. 2020] Disponível em: [http://www.neptjournal.com/upload-images/NL-53-27-\(25\)D-250.pdf](http://www.neptjournal.com/upload-images/NL-53-27-(25)D-250.pdf);

[R.52] – TOST, M.; BAYER, B.; HITCH, M.; LUTTER, S.; MOSER, P.; FEIEL, S. - **Metal Mining's Environmental Pressures: A Review and Updated Estimates on CO<sub>2</sub> Emissions, Water Use, and Land Requirements** [Online]. 14 Ago. 2018, tabela 5. [Consultado a 31 Jan. 2020]. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/8/2881/pdf>;

[R.53] – EPA - **Emission Factors for Greenhouse Gas Inventories** [Online]. 4 Abr. 2014, tabela 2. [Consultado a 31 Jan. 2020]. Disponível em: [https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/emission-factors\\_2014.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/emission-factors_2014.pdf);

- [R.54] – EPA - **Emission Factors for Greenhouse Gas Inventories** [Online]. 9 Mar. 2018, tabela 1. [Consultado a 31 Jan. 2020]. Disponível em: [https://www.epa.gov/sites/production/files/2018-03/documents/emission-factors\\_mar\\_2018\\_0.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2018-03/documents/emission-factors_mar_2018_0.pdf);
- [R.55] – PIMENTA, Marta - Flue gas desulphurization through wet limestone process – adding acids and bases to the limestone suspension. Jul. 2010. Dissertação para obtenção de grau de mestre em engenharia química pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, equação (1) e (2). [Consultado a 31 Jan. 2020];
- [R.56] – DGEG - **Indicadores Energéticos** [Online]. 2019, fator de emissão anual do sistema electroprodutor [Consultado a 17 Out. 2019]. Disponível em: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/estatistica/energia/indicadores-energeticos/>;
- [R.57] – SNIAmb - **Visualizador SNIAmb** [Online]. 2019, Albufeiras de águas públicas [Consultado a 17 Abr. 2021]. Disponível em: <https://sniamb.apambiente.pt/content/geo-visualizador?language=pt-pt>;
- [R.58] – Agência Portuguesa do Ambiente - **Sistema de Informação sobre Avaliação de Impacte Ambiental** [Online]. 2020 [Consultado a 14 Ago. 2020]. Disponível em: [https://siaia.apambiente.pt/AIA\\_Todos.aspx](https://siaia.apambiente.pt/AIA_Todos.aspx);
- [R.59] – CHENG, V. K. M.; HAMMOND, G. P. - **Life-cycle energy densities and land-take requirements of various power generators: A UK perspective**, Journal of the Energy Institute. [Online]. 18 Fev. 2016, tabela 5 [Consultado a 17 Abr. 2021]. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1743967115300921>;
- [R.60] – Environmental Working Group - **Green Energy Guide**. [Online]. 8 Nov. 2000, tabela A2 [Consultado a 17 Abr. 2021]. Disponível em: <https://www.ewg.org/research/green-energy-guide>.
- [R.61] – APA - **Título Único Ambiental – Central de Ciclo Combinado da Tapada do Outeiro**. [Online]. 2012, pág. 2 [Consultado a 17 Abr. 2021]. Disponível em: [https://ladigital.apambiente.pt/1.1/Central%20de%20Ciclo%20Combinado%20da%20Tapada%20do%20Outeiro/TUA%20-%20Turbog%C3%A1s%20Central%20de%20CC%20da%20Tapada%20do%20Outeiro%20\(TUA000003407112019A\).pdf](https://ladigital.apambiente.pt/1.1/Central%20de%20Ciclo%20Combinado%20da%20Tapada%20do%20Outeiro/TUA%20-%20Turbog%C3%A1s%20Central%20de%20CC%20da%20Tapada%20do%20Outeiro%20(TUA000003407112019A).pdf)

## Anexos

### Anexo A

Anexo A: Listagem de fatores de emissão indireta associadas aos materiais utilizados nas fases de construção e exploração dos diversos tipos de centrais estudados nesta dissertação.

| Material               | Fator de emissão indireta<br>$\left( \frac{kg\ CO_{2eq}}{kg}; \frac{kg\ CO_{2eq}}{MWh}; \frac{kg\ CO_{2eq}}{Nm^3} \right)$ |              |              |
|------------------------|--|--------------|--------------|
|                        | Médio  | Mínimo       | Máximo       |
| Cimento                | 0,649  | 0,499 [R.39] | 0,800 [R.20] |
| Cascalho               | 0,004 [R.20]   |              |              |
| Água                   | 0,000  |              |              |
| Betão                  | 0,135  | 0,120 [R.40] | 0,150 [R.20] |
| Aço reforçado          | 1,840  | 1,490 [R.20] | 2,190        |
| Aço cromado            | 1,300 [R.39]   |              |              |
| Aço de baixa liga      | 2,130  | 1,770 [R.20] | 2,490        |
| Cobre                  | 4,680  | 2,770 [R.20] | 6,590        |
| Gasóleo                | 47,88 [R.41]   |              |              |
| Alumínio               | 8,140 [R.20]   |              |              |
| Lã mineral             | 1,200 [R.20]   |              |              |
| Plástico               | 2,700 [R.20]   | 2,160 [R.20] | 3,240 [R.20] |
| Calcário               | 0,010 [R.20]   |              |              |
| Ácido Clórico          | 0,890 [R.20]   |              |              |
| Hipoclorito de sódio   | 0,920 [R.20]   |              |              |
| Amoníaco               | 2,110 [R.20]   |              |              |
| Hidróxido de sódio     | 0,460 [R.20]   |              |              |
| Cloreto de ferro (III) | 0,180 [R.20]   |              |              |
| Sulfato de alumínio    | 0,500 [R.20]   |              |              |
| Hidrogénio             | 1,630 [R.20]   |              |              |
| Óleo lubrificante      | 1,070 [R.20]   |              |              |
| Solvente               | 0,950 [R.20]   |              |              |
| Ferro                  | 1,710 [R.20]   | 1,510 [R.20] | 1,910 [R.20] |
| Cromo                  | 0,0001 [R.42]  |              |              |
| Aço com carbono        | 0,019 [R.43]   |              |              |
| Manganés               | 0,001 [R.44]   |              |              |
| Molibdénio             | 0,091 [R.45]   |              |              |
| Silício                | 4,68 [R.46]  |              |              |
| Vanádio                | 0,03 [R.47]  |              |              |
| SF <sub>6</sub>        | 120 [R.20]   |              |              |
| Carvão                 | 0,42 [R.41]  |              |              |
| Óleo combustível       | 47,88 [R.41]   |              |              |

|  |               |              |              |
|--|---------------|--------------|--------------|
| Propano                                | 0,16 [R.41]   |              |              |
| CO <sub>2</sub>                        | 0,82 [R.20]   |              |              |
| Gás natural                            | 0,0001 [R.41] |              |              |
| Gasolina                               | 41,76 [R.41]  |              |              |
| Resina                                 | 3,67 [R.20]   |              |              |
| Fibra de vidro                         | 2,6 [R.20]    | 2,08 [R.20]  | 3,12 [R.20]  |
| Madeira                                | 0,07 [R.48]   |              |              |
| Polímero                               | 2,2 [R.20]    |              |              |
| Vidro                                  | 0,85 [R.20]   |              |              |
| Cerâmica                               | 0,114 [R.49]  |              |              |
| Íman                                   | 27,602 [R.50] |              |              |
| Refrigerante                           | 3,615 [R.20]  | 3,09 [R.20]  | 4,14 [R.20]  |
| Aço inoxidável                         | 6,15 [R.20]   |              |              |
| Tinta                                  | 4,11 [R.51]   |              |              |
| Papel                                  | 2,42 [R.20]   | 1,936 [R.20] | 2,904 [R.20] |
| Óxido de cálcio                        | 0,15 [R.20]   | 0,075 [R.20] | 0,225 [R.20] |
| Areia (quartzo)                        | 0,01 [R.20]   |              |              |
| Ácido clorídrico [20%]                 | 0,89 [R.20]   |              |              |
| Ácido clorídrico [30%]                 | 1,2 [R.20]    | 0,6 [R.20]   | 1,8 [R.20]   |
| Ácido nítrico                          | 2,17 [R.20]   | 1,55 [R.20]  | 2,79 [R.20]  |
| Azoto                                  | 0,43 [R.20]   |              |              |
| Vapor de água                          | 0,61 [R.20]   |              |              |
| Ácido fluorídrico                      | 2,82 [R.20]   |              |              |
| Detergente                             | 1,75 [R.20]   |              |              |
| Etanol                                 | 1,24 [R.20]   |              |              |
| Ácido fosfórico                        | 1,45 [R.20]   | 0,725 [R.20] | 2,175 [R.20] |
| Hidróxido de potássio                  | 1,94 [R.20]   |              |              |
| Prata                                  | 23300 [R.52]  |              |              |
| Polietileno tereftalato (PET)          | 1,76 [R.20]   | 1,408 [R.20] | 2,112 [R.20] |
| Fluoreto de polivinil (PVF)            | 2,2 [R.20]    |              |              |
| Espuma vinílica acetinada (EVA)        | 2,11 [R.20]   |              |              |
| Isopropanol                            | 3,84 [R.20]   |              |              |
| Chumbo                                 | 1,64 [R.20]   | 1,148 [R.20] | 2,132 [R.20] |
| Policarbonato                          | 2,2 [R.20]    |              |              |
| Poliuretano                            | 3,61 [R.20]   |              |              |
| Acrilonitrila butadieno estireno (ABS) | 3,46 [R.20]   |              |              |
| Poliamida                              | 2,2 [R.20]    |              |              |

## Anexo B

*Anexo B: Listagem de fatores de emissão direta associadas aos materiais utilizados nas fases de construção e exploração dos diversos tipos de centrais estudados nesta dissertação.*

| Material                           | Fator de emissão direta médio       |                                    |                                   |                                      |
|------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
|                                    | $\left(\frac{kg\ CO_2}{MWh}\right)$ | $\left(\frac{kg\ CO_2}{kg}\right)$ | $\left(\frac{kg\ CO_2}{L}\right)$ | $\left(\frac{kg\ CO_2}{Nm^3}\right)$ |
| Gás natural <sup>[R.20]</sup>      | -                                   | 2,82                               | -                                 | 2,26                                 |
| Gasóleo <sup>[R.54]</sup>          | 269,42                              | 3,19                               | 2,70                              | -                                    |
| Gasolina <sup>[R.54]</sup>         | -                                   | -                                  | 2,32                              | -                                    |
| Carvão <sup>[R.54]</sup>           | -                                   | 2,93                               | -                                 | -                                    |
| Óleo combustível <sup>[R.20]</sup> | 290,00                              | 3,14                               | -                                 | -                                    |
| Propano <sup>[R.54]</sup>          | -                                   | 2,70                               | -                                 | -                                    |
| Calcário <sup>[R.55]</sup>         | -                                   | 0,44                               | -                                 | -                                    |
| SF <sub>6</sub> <sup>[R.26]</sup>  | -                                   | 23500,00                           | -                                 | -                                    |

## Anexo C

*Anexo C: Fator de emissão indireta associado ao uso de eletricidade proveniente do mix de geração de energia elétrica de Portugal obtido pela DGEG<sup>[R.56]</sup>. O fator de emissão correspondente ao ano 2000 foi também utilizado para cálculos associados a usos de eletricidade anteriores ao ano 2000.*

| Ano  | Fator de emissão<br>$\left(\frac{kg\ CO_2}{MWh}\right)$ |
|------|---|
| 2000 | 429,13  |
| 2001 | 400,59  |
| 2002 | 480,52  |
| 2003 | 373,42  |
| 2004 | 406,01  |
| 2005 | 462,16  |
| 2006 | 373,03  |
| 2007 | 341,20  |
| 2008 | 339,52  |
| 2009 | 322,93  |
| 2010 | 201,59  |
| 2011 | 250,07  |
| 2012 | 302,63  |
| 2013 | 219,93  |
| 2014 | 216,79  |
| 2015 | 291,15  |
| 2016 | 238,20  |
| 2017 | 256,11  |
| 2018 | 258,00  |